



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

3D SKENER PRO VÝUKOVÉ ÚČELY

3D SCANNER FOR EDUCATIONAL PURPOSES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Romanovský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Bc. Jiří Romanovský
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Tomáš Koutecký, Ph.D.
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

3D skener pro výukové účely

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

3D skenery různých typů jsou v současné době již velmi rozšířená a používaná zařízení. Komerční 3D skenery jsou pro uživatele stále více uzavřené a nejsou vhodné pro hlubší pochopení principů spojených s 3D skenováním. Návrh a konstrukce 3D skeneru dá vzniknout zařízení vhodnému pro demonstraci základních principů a rozvoj znalostí v oblasti 3D skenování.

Typ práce: výzkumná

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je konstrukce 3D skeneru za použití projekční jednotky DLP LightCrafter a kamery Imaging Source. Cílem je dále aplikovat základní kódovací vzory a z pořízených snímků těchto vzorů rekonstruovat prostorová data.

Dílčí cíle diplomové práce:

- identifikovat klíčové parametry a navrhnout konstrukci 3D skeneru,
- navrhnout vhodné metody pro kalibraci, kódování a dekódování vzoru, vytvoření mraku bodů a polygonální sítě,
- realizovat navržené metody v prostředí Matlabu,
- ověřit dosažené výsledky skenování porovnáním s komerčním skenerem,
- vytvořit uživatelský manuál.

Požadované výstupy: funkční vzorek, průvodní zpráva, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam doporučené literatury:

OLSEN, M. D. Structured Light in Matlab, Kongens Lyngby. IMM DTU, 2010.

SURIANSKY, J. a M. CMARADA. Analysis of methods for camera calibration in 3D scanning systems, Annals of DAAAM for 2012 & Proceedings of the 23rd International DAAAM Symposium, 2012, vol. 23, no. 1, pp. 365-368.

LANMAN, D. a G. TAUBIN. Build Your Own 3D Scanner: Optical Triangulation for Beginners, SIGGRAPH 2009 Course Notes, [online] Dostupné z: <http://mesh.brown.edu/byo3d/>, [cit. 2015-11-23]

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem 3D optického skeneru využívajícího metody projekce strukturovaného světla. Cílem této diplomové práce je demonstrovat principy a procesy 3D skenování s využitím projektoru DLP LightCrafter a kamery ImagingSource. Jednotlivé etapy procesu měření budou realizovány v softwarovém prostředí Matlab, tak aby byly názorně popsány jednotlivé principy a metody využívané při digitalizaci objektů.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D skener, DLP, strukturované světlo, kalibrace optického systému, mrak bodů

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the design of a 3D optical scanner using the structured light projection method. The aim of this thesis is to demonstrate the principles and processes of 3D scanning by using the DLP LightCrafter projector and the ImagingSource camera. The individual stages of the measurement process will be implemented to the Matlab software environment to describe the various principles and methods which can be used for digitizing the objects.

KEY WORDS

3D scanner, DLP, structured light, optical system calibration, point cloud

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ROMANOVSKÝ, J. *3D skener pro výukové účely*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017 77 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Koutecký Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce Ing. Tomáši Kouteckému, Ph.D. za jeho trpělivost, odborné vedení, cenné rady a připomínky. Nesmírně rád bych poděkoval svým rodičům, přítelkyni a nejbližším příbuzným, kteří mne podporovali po celou dobu mého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *3D skener pro výukové účely* vypracoval samostatně a pod vedením Ing. Tomáše Kouteckého, Ph.D. a uvedl jsem v seznamu zdrojů všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 19. května 2017

.....

Podpis autora

Obsah

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	14
2.1	Základní charakteristiky 3D skeneru	14
2.2	Rozdělení 3D skenovacích metod.....	14
2.2.1	Dotykové skenery	15
2.2.2	Bezdotykové skenery.....	15
2.3	Optické 3D skenery	16
2.3.1	Aktivní 3D skenery.....	16
2.3.2	Pasivní měřicí systémy	17
2.4	Laserová projekce	19
2.4.1	Dálkoměrné 3D skenery	19
2.4.2	Triangulační 3D skenery	19
2.5	3D skenování metodou strukturovaného světla	20
2.6	Klasifikace jednotlivých typů promítaných vzorů.....	21
2.6.1	Temporální kódování	21
	22
	Kombinace grayova kódu a fázového posuvu	23
2.6.2	Prostorové kódování	24
2.6.3	Přímé kódování.....	24
2.7	Kalibrace kamery a projektoru.....	25
2.7.1	Kalibrační metody	25
2.7.2	Zhangova kalibrační metoda	26
2.7.3	Kalibrační software.....	26
2.8	Rekonstrukce povrchu	28
2.9	Základní triangulační algoritmy a pojmy.....	29
2.9.1	Konvexní obálka.....	29
2.9.2	Delaunayova triangulace	29
2.9.3	Voroného diagram	30
2.9.4	Algoritmus Marching cubes	31
2.9.5	Algoritmus α -shapes	32
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	34
3.1	Analýza problému.....	34
3.2	Vymezení cílů práce	34
3.2.1	Primární cíle	34
3.2.2	Dílčí cíle	34
4	MATERIÁL A METODY	36
4.1	Měřicí řetězec	36
4.1.1	DLP projektor LightCrafterProjektor	37
4.1.2	CCD kamera ImagingSource.....	39
4.1.3	Stativová lišta 3D skeneru	40
4.2	Komunikace mezi PC a projektorem LightCrafter	42
4.2.1	Příkazové pakety.....	42
4.2.2	Knihovna pro ovládání projektoru.....	43
4.2.3	GUI pro ovládání projektoru	43
4.3	Komunikace mezi PC a kamerou.....	44
4.4	Kalibrace kamery	45
4.4.1	Zhangova metoda	45

4.4.2	Ovládání kalibračního tooboxu.....	46
4.5	Kalibrace projektoru.....	47
4.6	Projekce strukturovaného světla	48
4.6.1	Binární a Grayův kód.....	48
4.7	Rekonstrukce povrchu.....	50
4.7.1	Vytvoření mraku bodů	50
4.7.2	Filtrace mraku bodů	51
4.7.3	Polygonizace mraku bodů.....	51
5	VÝSLEDKY	53
5.1	Konstrukce stativu 3D skeneru	53
5.2	Výsledky ukázkového 3D skenování	54
5.2.1	Výsledky kalibrace kamery	54
5.2.2	Výsledky kalibrace projektoru.....	55
5.2.3	Výsledky kalibrace optického systému.....	56
5.2.4	Volba referenčních objektů.....	57
5.2.5	Výsledky dekodování promítané sekvence.....	58
5.2.6	Výsledný mrak bodů	60
5.3	Ovládání 3D skeneru.....	61
5.3.1	Ovládací prostředí kamery a projektoru 3D skeneru	61
5.3.2	Grafické rozhraní kalibrace 3D skeneru	62
5.3.3	Grafické rozhraní dekodování projekce.....	63
5.3.4	Grafické rozhraní zpracování a vizualizace mraku bodů.....	63
5.4	Porovnání přesnosti s komerčním 3D skenerem.....	64
6	Diskuze.....	67
6.1	Konstrukce 3D skeneru	67
6.2	Kalibrace 3D skeneru	67
6.3	Dekodování binárního a Grayova kódu	67
6.4	Vytvoření mraku bodů	67
6.5	Ovládací software 3D skeneru	68
6.6	Výsledky porovnání s komerčním 3D skenerem ATOS.....	68
7	Závěr	69
8	Seznam Použitých zdrojů.....	70
9	Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin.....	73
10	Seznam obrázků a grafů.....	74
11	Seznam tabulek	76
12	Seznam příloh.....	77

1 ÚVOD

1

3D skenery jsou zařízení sloužící k zaznamenání prostorových tvarů objektů do podoby virtuálních 3D dat. Tyto data lze následně editovat ve speciálních softwarech, které k tomuto účelu poskytují široké spektrum nástrojů. Na dnešní trhu je mnoho typů zařízení umožňující zaznamenání tvaru objektu. Od zařízení pro měření souřadnic povrchu (CMM), ručních laserových 3D skenerů až po systémy využívající metody strukturovaného světla. Rovněž oblast použití těchto zařízení je velmi široká. Zahrnuje výstupní kontrolu součástí ve strojírenství, reverzní inženýrství, lékařství, oděvní průmysl, archeologii, animaci a filmový průmysl.

3D skenery využívají k záznamu tvaru objektu široké spektrum metod. Každá metoda má určitá omezení a je proto nezbytně nutné znát způsob přesného použití skeneru. V posledních letech mají dominantní postavení bezdotykové optické 3D skenery, které vynikají rychlostí a vysokou přesností měření. Zástupcem takového systému je 3D skener ATOS od německé firmy GOM. 3D skener ATOS, který je na velmi vysoké technické úrovni využívá k záznamu tvaru objektu metodu strukturovaného světla. Výhodou tohoto systému je uživatelská přívětivost, kdy uživatel nemusí podrobně znát jednotlivé procesy záznamu a zpracování dat. Z tohoto důvodu, ale nelze ATOS použít k demonstraci teorie skryté za 3D skenováním a pro případné výzkumné účely. K tomuto účelu lze využít např. promítací jednotku DLP Lightcrafter a kameru ImagingSource. Využitím těchto zařízení je možné sestavit 3D skener založený na metodě strukturovaného světla, který poodhalí teorii potřebnou k záznamu tvaru objektu. Tento aspekt je důležitý pro studium a demonstraci základních skenovacích metod vedoucích k záznamu tvaru objektu. Přidanou hodnotou takto sestaveného zařízení je také možnost vytvoření a odzkoušení dalších metod založených na promítání strukturovaného světla, které není u komerčních 3D skenerů jako např. ATOS možné. Tento výzkum je významný při zkoumání různých kodifikačních schémat, které mohou vést k větší spolehlivosti záznamu tvaru objektu. Tímto je myšleno zejména zkoumání vlivů různých povrchů měřeného objektu, a také např. vliv různé velikosti triangulační základny 3D skeneru. Cílem diplomové práce je tedy navrhnout univerzální 3D skener, který umožní demonstraci základních kodifikačních schémat a vývoj dalších metod vedoucích k záznamu tvaru objektu.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

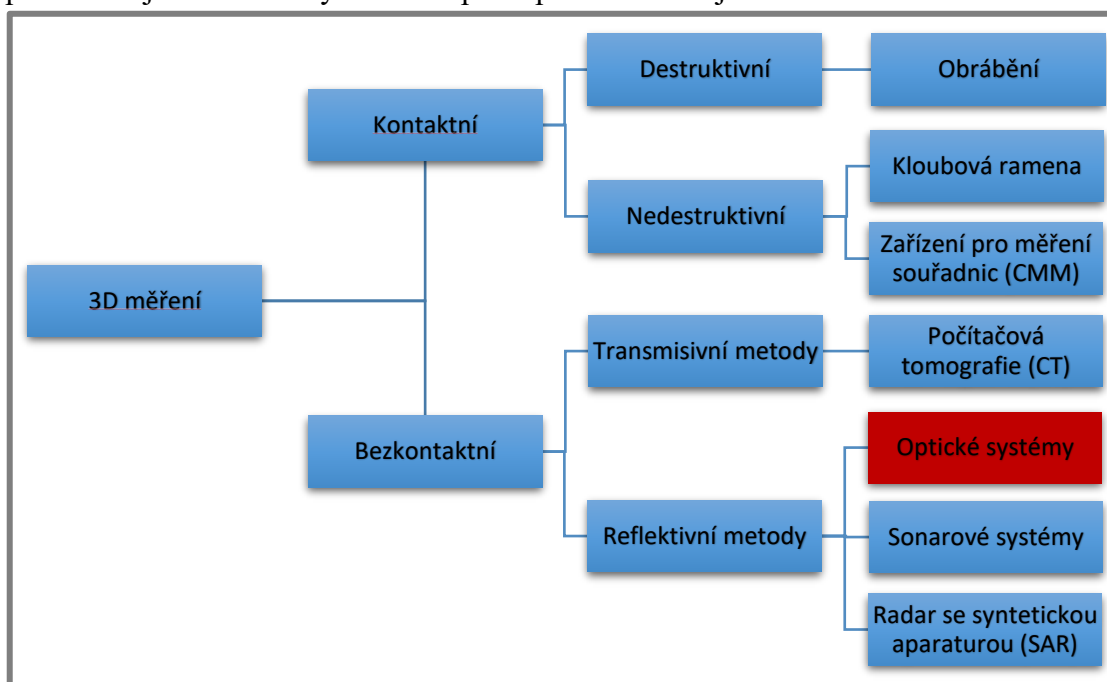
2.1 Základní charakteristiky 3D skeneru

3D skener je zařízení sloužící k zaznamenání tvaru objektu a jeho převedení do podoby virtuálních 3D dat. Tyto systémy lze hodnotit z několika hledisek, jako jsou přesnost, rozlišení, rychlost, flexibilita, robustnost a pořizovací cena. Při volbě skenovací metody je proto nutné důkladně zvážit, které vlastnosti 3D skeneru jsou pro danou aplikaci klíčové. [1]

<u>Přesnost:</u>	Přesnost je ukazatel, který popisuje odchylku mezi měřeným objektem a digitalizovaným modelem
<u>Rozlišení:</u>	Rozlišení skenovacího systému udává hustotu bodů (3D souřadnic) zaměřených na objektu
<u>Rychlost:</u>	Rychlost skenovacího systému určuje potřebný čas pro získání informací o skenovaném objektu
<u>Flexibilita:</u>	Flexibilita měřicího systému udává míru schopnosti skenovat různé velikosti a tvary (např. díry) objektů
<u>Robustnost:</u>	Robustnost měřicího systému popisuje vliv vnějšího prostředí (světlo, odrazivost povrchu aj.) na výslednou kvalitu modelu
<u>Cena:</u>	Na současném trhu je mnoho 3D skenerů, jejichž cena se může velmi lišit. Z tohoto důvodu je velmi důležité zvážit, kde bude skener implementován a jaké poskytuje výrobce 3D skeneru softwarové nástroje pro úpravu polygonálních dat, a zda jsou tyto nástroje v ceně 3D skeneru či ne

2.2 Rozdělení 3D skenovacích metod

Zařízení pro získání prostorových dat lze rozdělit podle několika hledisek. Obecně používané je dělení dle fyzikálních principů snímání objektu viz **Obr. 2-1**.



Obr. 2-1 Rozdělení skenovacích metod dle fyzikálních principů [1]

2.2.1 Dotykové skenery

2.2.1

Kontaktní skenery CMM využívají dotykové sondy, které se fyzicky dotýkají skenovaného povrchu. Sonda je připevněna k vertikálnímu ramenu, které umožňuje pohyb kolmý k měřicímu stolu. Souřadnice jednotlivých bodů měření jsou odečítány z posunutí aktuátorů kolem tří ortogonálních os měřicího stolu. Tyto dotykové měřicí systémy dosahují přesnosti až 1 μm . Jejich velkou nevýhodou je malý měřicí objem, který je omezen velikostí měřicího stolu a časová náročnost měření. [1]

2.2.2 Bezdotykové skenery

2.2.2.

Bezdotykové skenery jsou charakteristické tím, že emitují určitý druh záření, které interaguje s měřeným objektem. Podle typu interakce s objektem, lze bezdotykové skenery dále rozdělit na reflektivní a transmisivní.

Transmisivní systémy – CT (Computed Tomography)

V těchto bezdotykových systémech je skenovaný objekt umístěn mezi emitorem a detektorem záření. Typickým reprezentantem této metody je Computed Tomography system (CT). CT metoda je využívána především v lékařství, průmyslu a tam kde je potřeba zjistit informace o vnitřní struktuře objektu. [1]

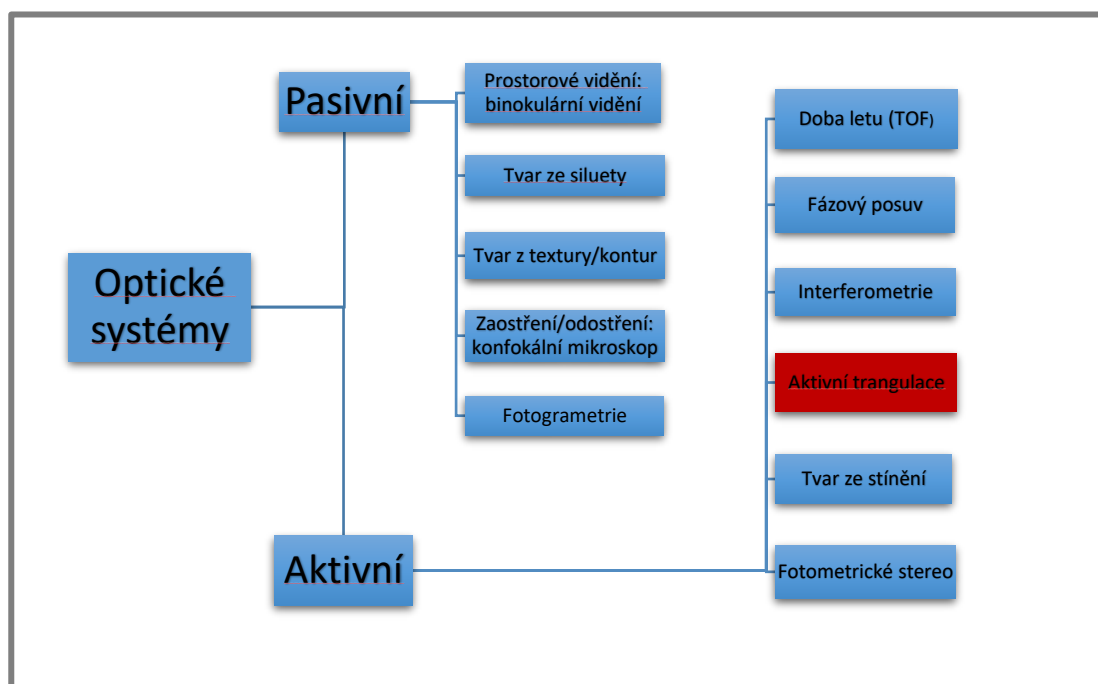
Princip výpočetní tomografie je poměrně jednoduchý. Spočívá v tom, že rozdílné materiály absorbují rentgenové (RTG) záření různě. Na snímku jsou rozdílné materiály rozlišitelné podle velikosti útlumu RTG paprsků procházejících objektem. Výsledný 3D model skenovaného objektu je složen z jednotlivých snímků pořízených z různých pozic a úhlů. [2]

Reflektivní systémy

Reflektivní systémy 3D skenování využívají odrazu záření od povrchu objektu pro výpočet polohy bodů na měřeném povrchu. Tyto systémy se dále dělí, dle typu použitého záření na optické, mikrovlnné a sonarové. [1]

2.3 Optické 3D skenery

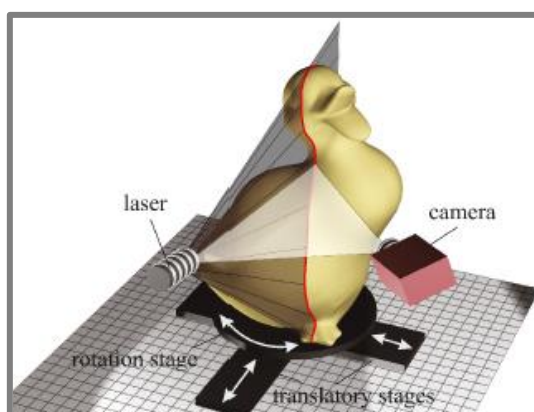
V metrologii a reverzním inženýrství zaujímají optické skenovací systémy majoritní postavení. Jejich velkou výhodou oproti dotykovým skenovacím metodám je vyšší rychlost skenování a větší množství naměřených bodů. Díky tomu lze měřit objekty i s velmi složitým povrchem. Optické 3D skenery se dále rozdělují na aktivní 3D skenery a pasivní 3D skenery viz **Obr. 2-2** [1].



Obr. 2-2 Rozdělení optických skenovacích systémů [1]

2.3.1 Aktivní 3D skenery

Aktivní 3D skenery promítají na povrch skenovaného objektu určitý druh elektromagnetického záření, které je zachyceno adekvátním senzorem např. kamerou



Obr. 2-3 Schéma aktivního laserového 3D skeneru [3]

s CCD senzorem. [1] Vzor promítaný na povrch objektu je analyzován a dekodován viz **Obr. 2-3**.

Dekódování promítaného vzorů spočívá v nalezení shodných bodů tzv. korespondentů mezi kamerou a emitorem záření. Po nalezení korespondentů jsou triangulací vypočítány souřadnice měřeného bodu. Výstupem dekodování je množina bodů v prostoru tzv. *mrak bodů*, který reprezentuje povrch tělesa. Ve srovnání s pasivními a dotykovými metodami skenování, závisí výsledky měření na materiálových vlastnostech skenovaného tělesa, kdy se mohou nepříznivě projevit silně odrazivé nebo průsvitné povrchy tělesa. V takových případech je nutné na povrch měřeného objektu nanést matnící přípravek, který eliminuje odrazivost měřeného povrchu. [3]

2.3.2 Pasivní měřicí systémy

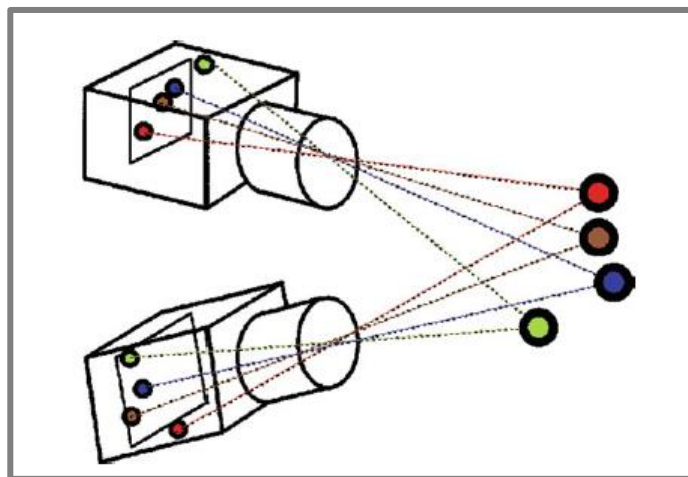
2.3.2

Pasivní skenovací systémy neemitují na povrch měřeného tělesa žádný druh záření. Kamera s CCD senzorem zachycuje snímky scény pořízené z různých úhlů. Snímky jsou následně analyzovány pro výpočet 3D souřadnic některých bodů scény. Tyto systémy jsou poměrně levné, avšak nejsou schopné produkovat hustý mrak bodů, jako u aktivních 3D skenovacích systému, takže se hodí pro měření velkých objektů. Pasivní metody měření mohou být rozděleny podle přístupu na více pohledové a jedno pohledové. [4]

Více pohledové metody

V těchto metodách je scéna zachycena ve dvou nebo více pohledech. K tomuto účelu lze využít dvou kamer, které scénu snímají současně (stereo) nebo jedné kamery, která se přesunuje do různých pozic scény (structure from motion – SfM). Ze shromážděných snímků následně systém vypočte 3D strukturu scény. [4]

Stereo systémy viz **Obr. 2-4** snímají scénu simultánně využitím dvou nebo více kamer. Např. systém s dvěma kamerami je nazýván jako binokulární stereo, s třemi kamerami jako trinokulární stereo. Systémy s binokulárním uspořádáním mohou být v počítačové grafice také nazývány jako stereo vidění. Princip těchto systému je založen na hledání shodných míst (korespondentů) na snímcích z levé a pravé kamery. Jestliže je nalezen korespondent je možné určit dva směry (3D paprsek) podél, kterých



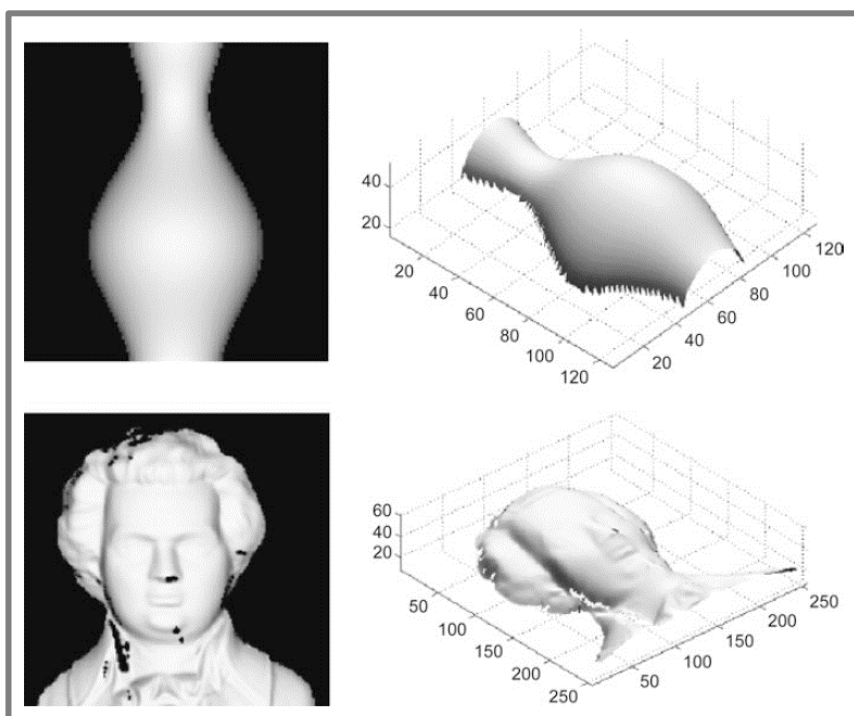
Obr. 2-4 Princip jedné z pasivních metod - stereoskopie [1]

musí daný bod ležet. K určení 3D pozice bodu scény je potřeba nalézt průsečík 3D paprsku levé a pravé kamery. To je provedeno postupem zvaným triangulace. [4]

Jedno pohledové metody

Jedno pohledové metody dokáží rekonstruovat 3D objekt scény využitím pouze jednoho pohledu. Informace o tvaru objektu jsou získávány pomocí stínů, textury nebo rozostření pohledu. Odtud jsou také odvozeny názvy těchto metod: *tvar ze stínování*, *tvar ze zaostření*, *tvar z textury*. [4]

Stínování na povrchu poskytuje informace o lokální povrchové orientaci a celkovém tvaru tělesa viz **Obr. 2-5**. *Tvar ze stínování* využívá k rekonstrukci povrchu stínování obrázku pořízeného ve stupních šedi. Tato metoda je založena na odrazivosti světla a světelné intenzitě snímku, kterými lze definovat orientaci normál povrchu objektu. Po posouzení orientace normál každého pixelu snímku jsou normály integrovány do hloubkové mapy pomocí regularizovaného fitování povrchu. Výpočet tvaru povrchu objektu je podstatně složitější než u více pohledových metod. Je to dáno velkou škálou parametrů, které vstupují do výpočtu. Jedná se např. o odrazivost povrchu, uniformní albedo a směr zdroje světla. [4]



Obr. 2-5 Ukázka rekonstrukce povrchu ze stínování [4]

2.4 Laserová projekce

2.4

Laserové 3D skenery jsou založeny na projekci laserového paprsku na snímáný objekt. Z hlediska principu lze tyto skenery rozdělit na dálkoměrné a triangulační.

2.4.1 Dálkoměrné 3D skenery

2.4.1

Systémy založené na impulsním dálkoměru

U těchto systémů 3D skenování je vzdálenost mezi měřeným objektem a emitorem paprsku vypočítána na základě času, který uběhne mezi vysláním a přijetím laserového impulsu. Díky vysoké tranzitní rychlosti elektromagnetické vlny jsou kladeny vysoké nároky na přesnost měření tranzitního času. [5]

Systémy založené na fázovém dálkoměru

Laserový paprsek je u těchto systémů modulován harmonickým vlněním. Vzdálenost mezi měřeným objektem a emitorem je vypočítána z fázového rozdílu mezi přijatým a odeslaným paprskem. [5]

2.4.2

2.4.2 Triangulační 3D skenery

Triangulační 3D skenery se vyznačují použitím emitoru laserového záření a jedné nebo dvou kamer s CCD senzorem. Emitor laserového záření, který je umístěn na jedné straně triangulační základny, vytváří na měřeném objektu bodovou nebo čárovou stopu. Kamera s CCD senzorem je umístěna na druhé straně triangulační základny, kde detekuje laserovou stopu na měřeném objektu. Vzdálenost měřeného bodu je poté vypočítána pomocí triangulace. [5]

2.5 3D skenování metodou strukturovaného světla

Metoda skenování pomocí strukturovaného světla je jedna z nejspolehlivějších technik, jak rychle a přesně vyhodnotit informace o geometrii tělesa. Tato technika je založena na projekci světelného vzoru na povrch tělesa. Promítnutý vzor je vlivem geometrie tělesa deformován a zaznamenán CCD kamerou. CCD kamera zachycuje těleso z jiného úhlu pohledu, díky čemuž je možné najít korespondenty mezi promítaným a snímaným obrazem. Souřadnice takto určeného bodu je vypočítána triangulací ze znalosti orientace kamery a projektoru v prostoru. Tato metoda se svými vlastnostmi řadí mezi aktivní triangulační metody 3D skenování. [6] Výhodou metody strukturovaného světla je zejména rychlost skenování objektů oproti laserovým nebo dotykovým metodám. Tato významná výhoda je dána tím, že promítaný světelný vzor je rozložen po podstatně větší části povrchu skenovaného objektu. Klasifikace jednotlivých typů strukturovaného světla je uvedena v kapitole 2.6.

2.6 Klasifikace jednotlivých typů promítaných vzorů

2.6

Jednotlivé promítané typy vzorů se skládají z unikátních setů pixelů. Každý promítaný pixel nese své vlastní kódové slovo, které je mapováno v promítaném vzoru pomocí různé úrovně šedi, barvy nebo geometrické reprezentace. S rostoucím počtem kódovaných bodů (vyšším rozlišením) se nejen zvyšuje náročnost mapování těchto bodů v promítaném vzoru, ale zároveň se zvyšuje hustota výsledné množiny bodů. Jednotlivé typy kódování je možné rozdělit do tří základních skupin, a to na temporární, prostorovou a přímou kodifikaci viz **Obr. 2-7**. Dále je možné vzory dělit dle periodicity kódových slov, barevné hloubky a možnosti měření pohybujících se objektů. [7]

2.6.1 Temporární kódování

2.6.1

Temporární kódování je charakteristické tím, že každému bodu (pixelu) je přiřazeno kódové slovo, závislé na hodnotě světelné intenzity bodu (pixelu) a počtu snímku v dané sekvenci promítaného vzoru. Promítaný vzor mění své parametry v závislosti na čase. [6]

Výhody temporárního kódování:

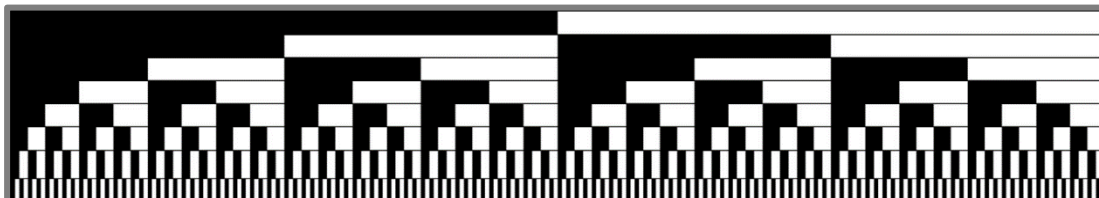
- Vysoké rozlišení (velký počet bodů)
- Vysoká přesnost (v řádech μm)
- Stabilita u barevných objektů

Nevýhody temporárního kódování:





- Pouze statické objekty
- Nutnost použití většího počtu vzorů (náročnější na čas) [8]

Vzory založené na binárním kódu

Vzory založené na binárním kódu jsou součástí temporárního druhu kódování. Tyto vzory jsou založeny na sekvenčním promítání černobílých pruhů. Jako první promítání černobílých pruhů navrhli *Postdamer a Altschuler* v roce 1981. Jimi navržená projekce je složena ze sekvencí m vzorů na kódování 2^m pruhů při využití prostého binárního kódu. To znamená, že například u 8 bitové sekvence je počet pruhů 256 ($2^8 = 256$). Každý pruh v posledním promítnutém vzoru má své vlastní binární kódové slovo. Kódová slova jsou přiřazena k jednotlivým pixelům posloupností jedniček a nul z promítnutých m vzorů. Symbol 0 označuje černý pruh, zatímco symbol 1 pruh bílý. Maximální počet promítnutých pruhů závisí na rozlišení projektoru. Avšak dosažení maximální hodnoty rozlišení není doporučováno z důvodu nepřesné identifikace pruhů kamerou. Ukázka sekvence promítání binárního vzoru je uvedena na **Obr. 2-6**. [7]



Obr. 2-6 Ukázka binárního kódu [3]

Time-multiplexing	Binary codes 	Posdamer et al. Inokuchi et al. Minou et al. Trobina Valkenburg and Melvor Skocaj and Leonardis Rocchini et al.	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓
	n-ary codes	Caspi et al. Horn and Kiryati	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓
	Gray code + Phase shifting	Bergmann Sansoni et al. Wiora Gühring	✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓
	Hybrid methods	Kosuke Sato Hall-Holt and Rusinkiewicz	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓
	Non-formal codification	Maruyama and Abe Durdle et al. Ito and Ishii Boyer and Kak Chen et al.	✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓
Spatial Neighborhood	De Bruijn sequences 	Hügli and Maître Monks et al. Vuylsteke and Oosterlinck Salvi et al. Lavoie et al. Zhang et al.	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓
	M-arrays 	Morita et al. Petriu et al. Kiyasu et al. Spoelder et al. Griffin and Yee Davies and Nixon Morano et al.	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓
	Grey levels	Carrihill and Hummel Chazan and Kiryati Hung	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓
Direct coding	Colour 	Tajima and Iwakawa Smutny and Pajdla Geng Wust and Capson Tatsuo Sato	✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓ ✓
	Scene applicability	<i>Static</i> <i>Moving</i>	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓
	Pixel depth	<i>Binary</i> <i>Grey levels</i> <i>Colour</i>	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓
	Coding strategy	<i>Periodical</i> <i>Absolute</i>	✓ ✓	✓ ✓	✓ ✓

Obr. 2-7 Klasifikace různých typů kodifikace [7]

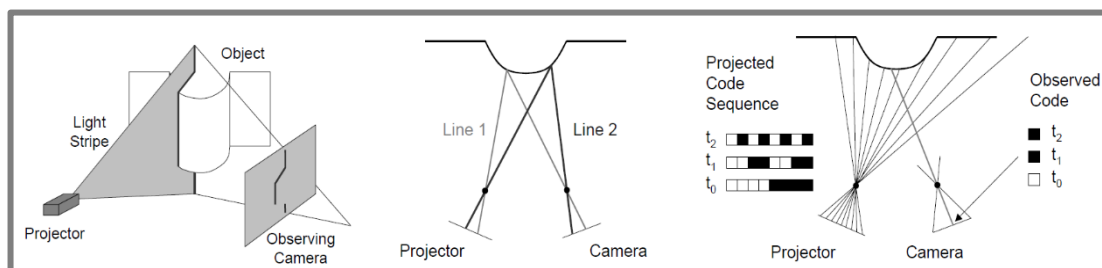
Grayův binární kód

Grayův binární kód je modifikací binárního kódu provedenou *Inokuchim*. Výhodou Grayova kódu je větší odolnost vůči okolnímu šumu. Samotná modifikace binárního kódu spočívá v tom, že *Hammingova vzdálenost* je vždy rovna jedné. Hammingova vzdálenost udává přesný počet znaků, o které se jednotlivá kódová slova liší. [7]

Kombinace grayova kódu a fázového posuvu

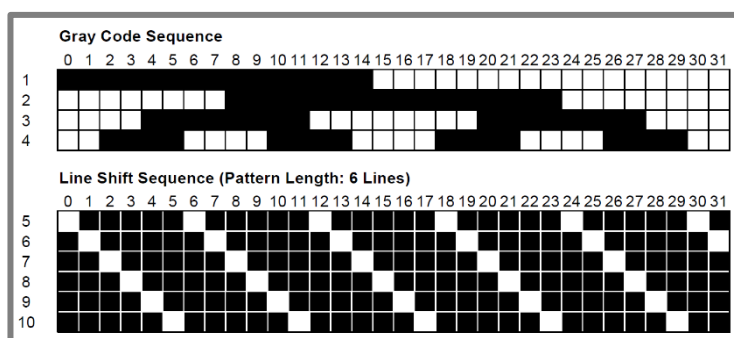
Metody založené na binárním a grayově kódování mají výhodu v tom, že kodifikace pixelu je provedena s velkou přesností. Ovšem, díky diskrétní povaze těchto vzorů je velkým limitem rozsah rozlišitelnosti kódování. Metody využívající fázový posuv přináší vyšší prostorové rozlišení díky promítání periodicky se opakujícího vzoru posutému o určitou vzdálenost na pixelové úrovni. Kombinací obou technik je dosaženo zvýšení přesnosti 3D rekonstrukce, i když za cenu většího počtu promítaných vzorů. [7]

Bergmann [9] navrhl metodu založenou na promítání grayova kódu v kombinaci s fázovým posuvem sinusového intenzitního vzoru. Sinusový vzor je zde reprezentován čtyřmi úrovněmi šedé barvy, která je složena ze základních šestnácti bitů. Tento přístup přinesl zvýšení prostorového rozlišení, ale také komplikace v případě měření nespojitých povrchů skenovaných objektů.



Obr. 2-8 Schéma promítání jednoho proužku a strukturovaného světla [11]

V roce 2001 byla *Guhringem* [10] představena nová metoda založená na liniovém posuvu promítaného vzoru. Guhringemova metoda využívá velmi robustní grayův kód, který se může lišit při chybě dekódování pouze o jeden bit. Na druhou stranu šířka světlých a tmavých pruhů je i při nejlepším rozlišení dvojnásobná oproti původnímu binárnímu vzoru. K odstranění tohoto neduhu je hojně využíván fázový liniový posuv.



Obr. 2-9 Znáznornění šedého kódu a liniového posuvu [11]

Liniový posuv promítaného vzoru je realizován projekcí několika černobílých proužků určeným směrem viz **Obr. 2-9**. Na rozdíl od sinusoidálních vzorů, které vykazovali nepřesnosti při měření nerovnoměrných povrchů, z důvodů že nedocházelo k patřičnému rozbalení fáze je tato metoda robustnější a odolnější i při měření nespojitých povrchů. [11]

2.6.2 Prostorové kódování

Prostorové kódování se vyznačuje tím, že koncentruje celé kódovací schéma do jednoho unikátního vzoru a tím pádem do jednoho snímku. Kódové slovo každého pixelu je získáno informací o intenzitě pixelů v jeho blízkém okolí. Dekódování vzoru, získaného prostorovým kódováním, může být občas problematické, pokud se v okolí určitého pixelu nachází nespojitost povrchu nebo stín. [6]

Výhody:

- Možnost snímat pohybující se objekty
- Koncentrace kódovacího schématu do jednoho vzoru

Nevýhody:

- Nižší rozlišení
- Obtíže s identifikací při použití vyššího počtu barev
- Nespojitosti a stíny mohou způsobit chyby dekodování [8]

2.6.3 Přímé kódování

U přímého kódování je každému kódovanému pixelu přiřazena jeho vlastní intenzita nebo barva. Jelikož je veškerá kodifikace obvykle koncentrovaná do jednoho unikátního vzoru je nutné použít široké spektrum barev a intenzit. [7]

Výhody:

- Teoreticky vysoké rozlišení
- Nízký počet promítaných vzorů

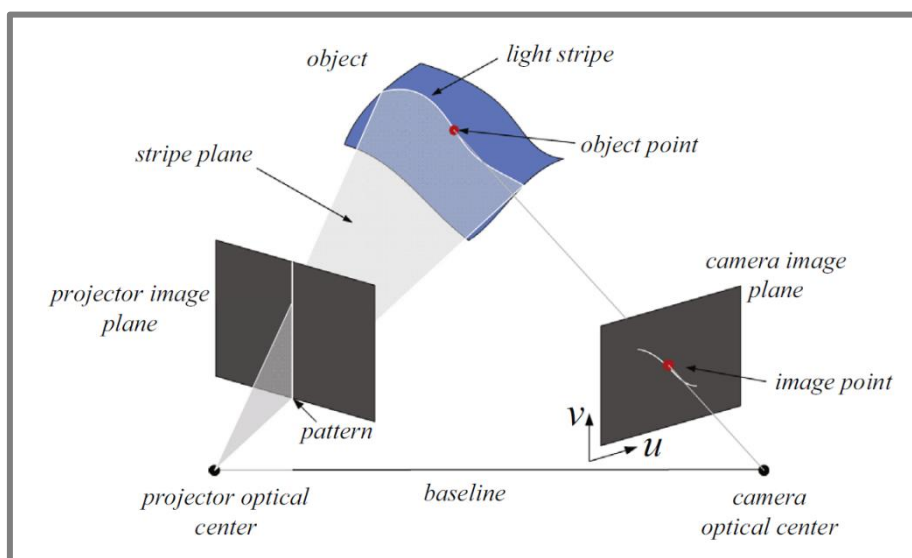
Nevýhody:

- Nízká přesnost (řádově okolo 1 mm)
- Velmi citlivá metoda na okolní šum [8]

2.7 Kalibrace kamery a projektoru

2.7

Před započítím samotného měření je nutné provést kalibraci kamery a projektoru. Kalibrace slouží k určení vnitřních a vnějších parametrů kamerového systému, které jsou nezbytné k určení 3D souřadnic z 2D snímků zachycených kamerou. Vnitřní parametry definují geometrické a optické charakteristiky kamery, zatímco vnější parametry určují pozici a orientaci kamery vzhledem ke globálnímu souřadnému systému. Existuje velké množství kalibračních metod, z nichž mnoho je založeno na práci R. Tsai [12]. Tyto kalibrační metody jsou dále popsány v následujících kapitolách. Na **Obr. 2-10** je znázorněna konfigurace 3D skeneru, který využívá metody strukturovaného světla.



Obr. 2-10 Princip skenování metodou strukturovaného světla [28]

2.7.1 Kalibrační metody

2.7.1

Kalibrace kamerového systému je nutný krok v oblasti 3D počítačového vidění k určení metrických informací z 2D snímků. V současné době rozlišujeme tyto techniky do dvou kategorií, a to na fotogrametrii a autonomní (self) kalibraci. [13]

Fotogrametrická kalibrace

Tato metoda je založena na snímání objektu, jehož geometrie je předem velmi dobře známa. Kalibrační objekt je sestaven ze dvou až tří překrývajících se ortogonálních rovin. Tento přístup ovšem zahrnuje poměrně drahou kalibrační aparaturu a komplikované nastavení. [13]

Autonomní kalibrace

Techniky využívané v této kategorii nepotřebují k získání potřebných informací žádný kalibrační objekt. Kamera snímá statickou scénu v odlišných pozicích tak, aby bylo možné srovnat jednotlivé snímky a nalézt na nich shodná místa. Pro definici vnitřních a vnějších parametrů kalibrace je nutné pořídit aspoň tři snímky a mít nastavenou fixní ohniskovou vzdálenost.

Jelikož je u těchto metod potřeba velké množství parametrů k vyhodnocení a také díky obtížné identifikaci shodných bodů jednotlivých snímků vlivem osvětlení aj., ne vždy jsou výsledky kalibrace uspokojivé. [13]

2.7.2 Zhangova kalibrační metoda

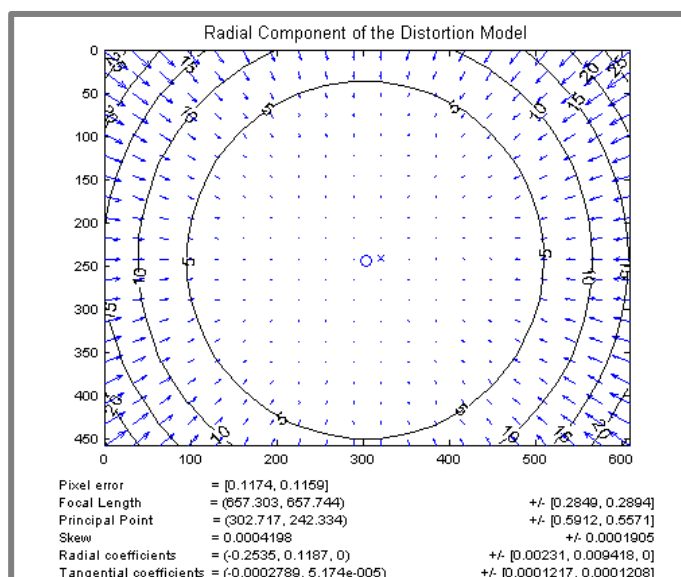
Zhangova metoda je velmi flexibilní kalibrační metodou, která vyžaduje pouze kameru a jeden rovinný kalibrační objekt zachycený alespoň ve třech rozdílných pozicích. Kamera nebo kalibrační vzor se může volně pohybovat do odlišných poloh, přičemž nemusíme znát přesnou změnu polohy mezi kamerou a kalibračním objektem. [13]

Zhangova metoda leží v rozdělení kalibračních metod na pomezí mezi fotogrametrickou kalibrací a autonomní kalibrací. Spojuje to nejlepší z obou metod v jeden celek. V porovnání s ostatními kalibračními metodami je velmi flexibilní a nenáročná na technické vybavení a čas. [13]

2.7.3 Kalibrační software

Camera calibration toolbox

Mezi nejpoužívanější volně dostupné kalibrační softwary patří *Camera calibration toolbox*. Tento robustní nástroj lze implementovat do matematického výpočetního prostředí Matlab. Samotný toolbox je založen na Zhangově kalibrační metodě a je dostupný z [14]. Tento software nabízí řadu nástrojů pro analýzu výsledků kalibrace, a s jeho pomocí dá snížit velikost kalibračních chyb na minimum. K posouzení velikosti kalibračních chyb software využívá tzv. reprojekční odchylku, která je vyjádřena v pixelech. Reprojekční odchylka udává nakolik se měřený bod shoduje s promítnutým. Software je rovněž schopen zobrazit tečné, normálové (viz Obr. 2-11) a celkové zkreslení čočky optického systému. [14]



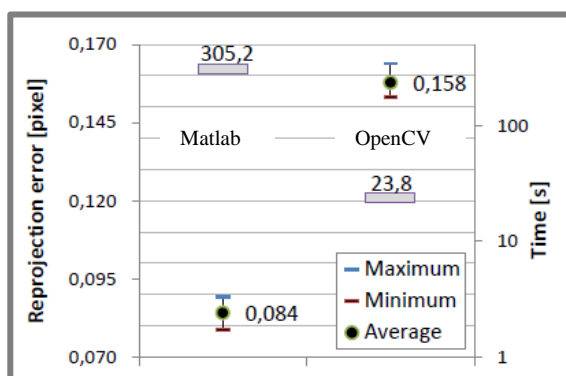
Obr. 2-11 Tečné zkreslení čočky optického systému [15]

Hlavní nevýhodou zmíněného toolboxu je, že určení hranic na kalibračním snímku zadává uživatel ručně, což například při dvaceti kalibračních snímcích je časově náročné. Naopak velkou výhodou toolboxu je jeho dostupnost a to, že toolbox je tzv.

„otevřený“, takže umožňuje uživateli provádět různé úpravy nebo nadstavby dle jeho specifických požadavků. [15]

OpenCV

Dalším hojně využívaným softwarem je *OpenCV* (Open Computer Vision). OpenCV je set knihoven vytvořených pro aplikaci v systémech počítačového vidění. V současnosti tato sada knihoven obsahuje více než 2500 optimalizovaných algoritmů, které jsou dostupné pro různé programovací jazyky (C, C++, Python, Java). Na rozdíl od kalibračního toolboxu pro matematické výpočetní prostředí Matlab je proces kalibrace v OpenCV plně automatický a lze ho využít pro systémy, které vyžadují provedení kalibrace v reálné čase. Nevýhodou systému OpenCV oproti předchozímu softwaru je uživatelská náročnost, která předpokládá znalost některého z výše uvedených programovacích jazyků a příslušného vývojového prostředí. [15]

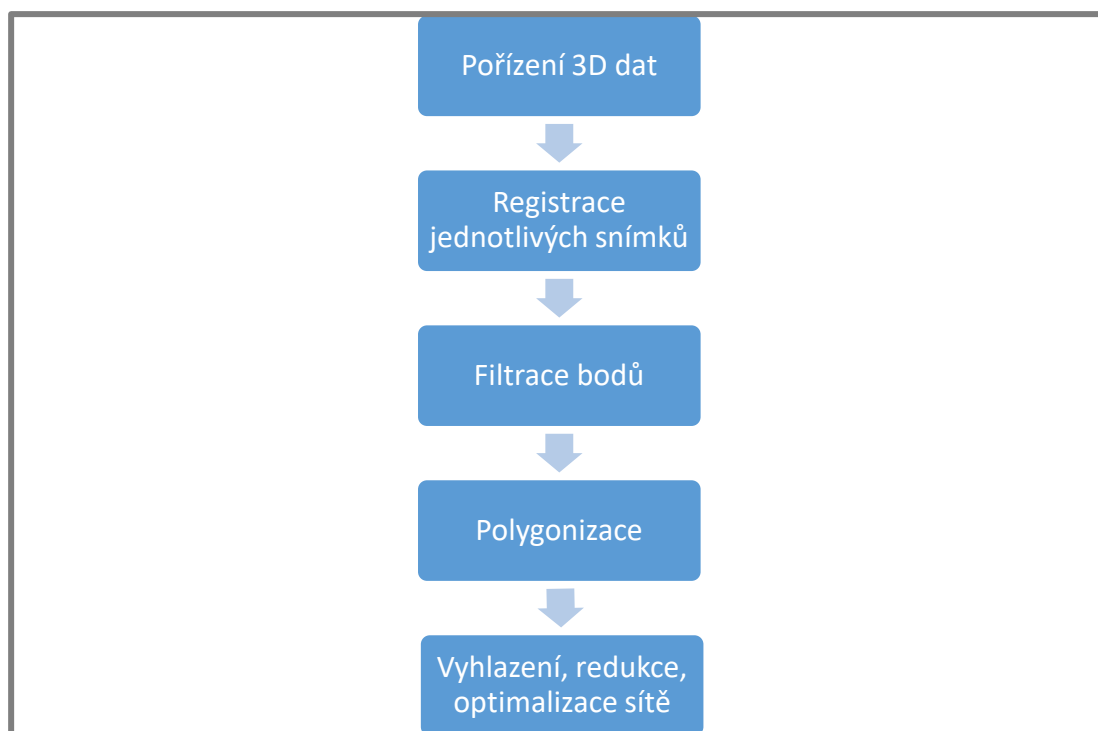


Obr. 2-12 Srovnání kalibračních softwarů [15]

Vhodnost a využití jednotlivých kalibračních softwarů záleží na prostředí, kde bude implementováno. Pro vyšší přesnost měření je vhodné využít kalibračního toolboxu pro Matlab. Pokud je zapotřebí vyšší rychlost kalibrace je vhodné zvolit OpenCV. Srovnání doby potřebné ke kalibraci a srovnání reprojekční chyby je uvedeno na **Obr. 2-12**. Oba softwary jsou volně dostupné a umožňují akademické i komerční využití. [15]

2.8 Rekonstrukce povrchu

Výsledkem 3D skenování obvykle tzv. *mračno bodů* (point cloud). Mračno bodů je tvořeno body, jejichž souřadnice byly dekodovány na základě hledání shodnosti intenzity pixelů v sekvencích snímků mezi kamerou a projektorem. Jelikož je znám prostorový vztah mezi kamerou a projektorem, lze poměrně snadno vypočíst souřadnice jednotlivých bodů triangulací. Mračno bodů je tedy poměrně rozsáhlá množina bodů (sta tisíce až miliony bodů) v 3D prostoru. Počet těchto bodů je závislý na velikosti skenovaného objektu a na rozlišení použité kamery a projektoru. Samotné body ovšem nejsou jako reprezentace povrchu objektu příliš vhodné. Z tohoto důvodu se mračna bodů převádí na polygonální síť, kterou lze kontrolovaně editovat.



Obr. 2-13 Metodika rekonstrukce povrchu [16]

K převedení mračna bodů bylo vyvinuto množství algoritmů jako např. *Delaunay triangulation*, *Voronoi diagram*, *α -shapes*, *Marching cube* a mnohé další. Aplikací těchto algoritmů je možné vytvořit tzv. *watertight* (vodotěsný) povrch objektu. Metodika rekonstrukce povrchu je znázorněna na **Obr. 2-13**. [16]

2.9 Základní triangulační algoritmy a pojmy

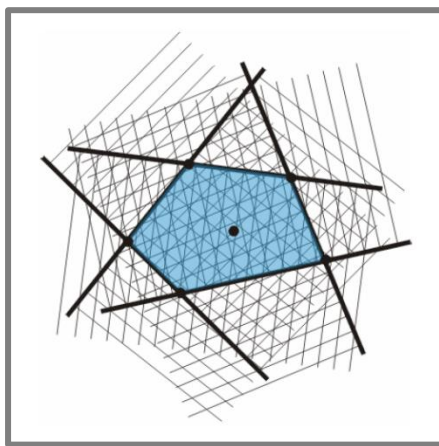
2.9

Základní triangulační algoritmy jsou založeny na triangulaci vstupní množiny bodů. Sít' trojúhelníků věrně aproximuje povrch tělesa a dále zajistí dekompozici 3D prostoru. Takto rozdělený povrch je možné dále rekonstruovat využitím složitějších algoritmů, které vytvoří isopovrch tělesa. Mezi nejvýznamnější aplikace triangulací patří počítačová grafika (vizualizace prostorových dat), kartografie, aproximace ploch, zpracování obrazu (segmentace, rozpoznávání vzoru) a předzpracování pro další algoritmy rekonstrukce povrchu.

2.9.1 Konvexní obálka

2.9.1

Množina bodů v prostoru M se nazývá konvexní, jestliže úsečka spojující libovolné dva body náleží do této množiny. Konvexní obal množiny M je reprezentován konvexním mnohoúhelníkem, jehož vrcholy jsou hraniční body množiny M a zároveň obsahuje všechny body dané množiny. Konvexní obálka se obvykle využívá jako pomocná geometrická struktura. Ukázka konvexní obálky tvořené šesti body je uvedena na **Obr. 2-14**. [17]



Obr. 2-14 Konvexní obálka množiny 6 bodů [19]

2.9.2 Delaunayova triangulace

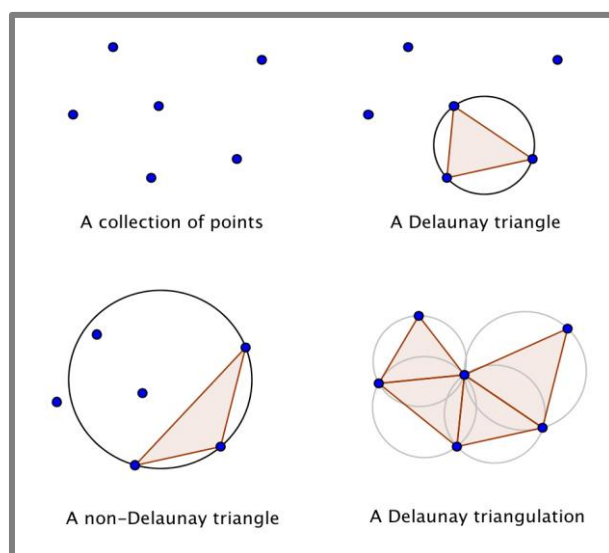
2.9.2

Delaunayova triangulace je využívána především pro předzpracování povrchu pro další algoritmy nebo má své využití při aproximaci ploch. Delaunayova triangulace vytváří z množiny nepravidelně rozložených bodů optimalizovanou sít' trojúhelníků (2D) nebo čtyřštěnů (3D).

Samotná Delaunayova triangulace je definována tak, že každý trojúhelník leží uvnitř opsané kružnice (ve 3D prostoru je definována koulí) přičemž uvnitř opsaného trojúhelníku neleží žádné body dané množiny bodů. Tato podmínka je jednoznačně splněna vždy, když na opsané kružnici leží tři vrcholy určitého trojúhelníku. Z této podmínky plyne i určitá nejednoznačnost triangulace např., když na kružnici leží více vrcholů. Ve zvláštním případě, kdy body leží na jedné přímce, nelze triangulaci sestavit. Ukázka sestavení Delaunayovy triangulace je znázorněna na **Obr. 2-15**. [18]

Mezi nejvýznamnější vlastnosti Delaunayovy triangulace patří:

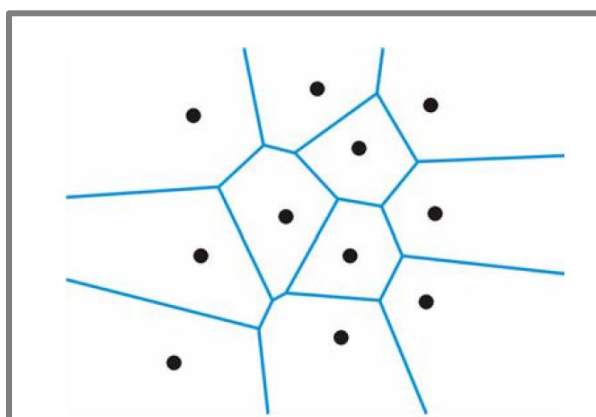
- Hranice je tvořena konvexní obálkou
- Maximalizuje minimální úhel, tzn. triangulace negeneruje příliš „ostré“ trojúhelníky
- Dualita s Voroného diagramem (možnost převedení Delaunayovy triangulace na Voroného diagram a naopak)
- Rozšiřitelnost do vyšších dimenzí



Obr. 2-15 Ukázka Delaunayovy triangulace [29]

2.9.3 Voroného diagram

Voroného diagram rozděluje množinu bodů M do n podoblastí tzv. Voronoiových buněk viz **Obr. 2-16**. Každé buňce n náleží bod m ze vstupní množiny bodů. Jednotlivé buňky lze definovat tak, že umístíme-li nový bod q do buňky n , která náleží bodu m , potom euklidovská vzdálenost bodu m a bodu q je rovna nebo menší než vzdálenost k jakémukoli jinému bodu z množiny M . [19]



Obr. 2-16 V – diagram množiny 11 bodů v 2D prostoru [19]

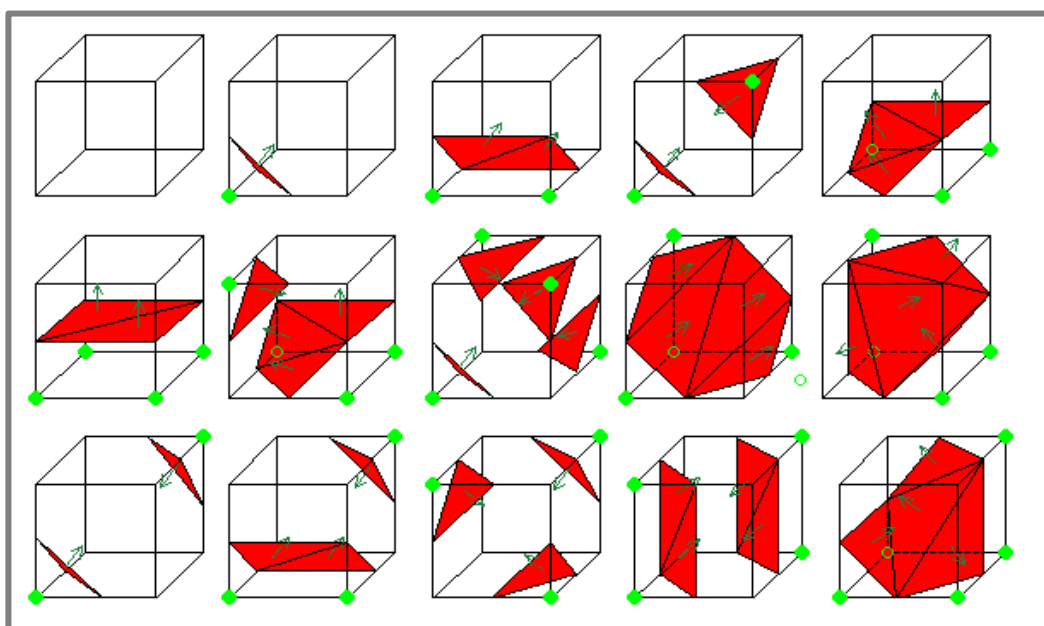
Voroného diagram je tedy definován množinou n buněk, které mají následující vlastnosti [19]:

- Každá buňka je konvexní
- Jakákoliv buňka obsahuje pouze jeden bod vstupní množiny
- Buňky ležící na konvexní obálce mohou být neuzavřené
- Dualita k Delaunayovy triangulaci
- Uzel diagramu je místo, ke kterému mají stejnou vzdálenost nejméně $m+1$ bodů

2.9.4 Algoritmus Marching cubes

2.9.4

Algoritmus Marching cubes vznikl na základě nutnosti zpracovat 3D lékařská data z CT, MT a SPECT. Dosavadní algoritmy totiž neumožňovaly využití všech důležitých informací z 3D dat. Algoritmus se skládá ze dvou hlavních kroků. V prvním kroku je vytvořena trojúhelníkovou síť. Následně jsou spočítány normály povrchu ve vrcholech každého trojúhelníku. [20]



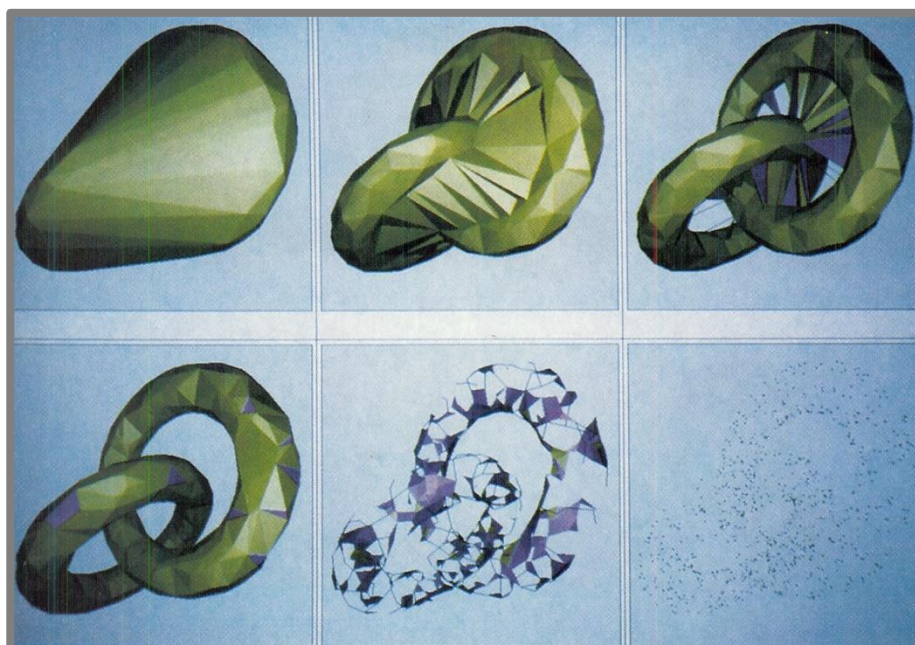
Obr. 2-17 Možnosti triangulace krychle [30]

Algoritmus Marching cubes využívá přístupu dělení prostoru k lokalizování povrchu v logické krychli, která je tvořena osmi pixely. Algoritmus určuje, jak povrch protíná určitou krychli. K nalezení protínajícího se povrchu v krychli je potřeba přiřadit funkční hodnoty k vrcholům krychle. Na základě těchto hodnot je možné určit, zda je daný vrchol vnitřním či vnějším bodem plochy ohraničené isokřivkou. Jelikož vrcholy krychle mohou nabývat pouze dvou stavů, máme $2^8 = 256$ možností, jak může povrch protnout krychli. Těchto 256 možností je následně redukováno využitím symetrie krychle do 15 vzorů. Posledním krokem MC algoritmu je výpočet normály pro každý vrchol trojúhelníku. Tento krok je důležitý pro možnost použití renderovacích algoritmů, které využívají směr normály k výpočtu modelů stínování. [20]

2.9.5 Algoritmus α -shapes

Algoritmus α -shapes je založen na dělení prostoru. Vlastností algoritmu je, že prostor dělí adaptivně (nepravidelně). Základní dekompozice (rozklad) prostoru je realizována využitím Delaunayovy tetrahedronizace (triangulace ve 3D). [21]

Dalším krokem je smazání tetrahedronů, trojúhelníků a hran vzniklých z Delaunayovy tetrahedronizace. K tomu slouží tzv. α -ball, což je koule s poloměrem α . Samotný poloměr α je vstupním parametrem do algoritmu. Smazání tetrahedronů, trojúhelníků a hran je realizováno na základě pravidla, které říká, že je smazán každý element, jehož vrcholy je opsaná nejmenší možná koule mající poloměr větší než α -ball. Výsledkem tohoto procesu je soubor tetrahedronů, trojúhelníků a hran, které nesou souhrnné označení α -shapes. Závislost parametru α a výsledné podoby α -shapes lze popsat při zadání limitní hodnoty parametru α jak lze vidět na Obr.1-18. Jestliže bude parametr α roven 0, pak je výsledkem α -shapes vstupní množina bodů. Pokud je parametr α větší, než hranice vstupní množiny bodů je výsledkem celá Delaunayova tetrahedronizace. [21]



Obr. 2-18 Vliv parametru α na výslednou podobu α -shapes. Zleva limitní hodnota parametru α , kdy je výsledkem celá Dt. Vpravo-dole limitní hodnota $\alpha=0$. [21]

Posledním krokem algoritmu je extrakce (vyjmutí) trojúhelníků z α -shapes podle následujícího pravidla: Jestliže aspoň jeden ze dvou α -ball interpolujících trojúhelník neobsahuje žádné další body ze vstupní množiny, potom trojúhelník náleží výslednému povrchu α -shapes. [21]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Na Ústavu konstruování je studentům k dispozici 3D skener ATOS, která je založen na metodě strukturovaného světla. Jedná se o velmi pokročilý systém, který umožňuje záznam tvaru objektu s vysokou přesností. K tomuto skeneru je dodávám také software ATOS Professional, který provádí zpracování nasnímaných dat v průběhu měření a software GOM Inspect pomocí, kterého jsou nasnímaná data dále zpracována do podoby polygonální sítě. Za celým tímto procesem je skryta celá řada metod, ke kterým nemá uživatel 3D skeneru přístup. Jedná se tedy o tzv. „uzavřený“ systém do kterého nelze implementovat další známe metody, popřípadě některé nové experimentální metody.

K těmto účelům je potřeba vytvořit 3D skener, který bude „otevřený“ a umožní demonstraci a pochopení základních metod a postupů použitých v procesu 3D skenování. Konfiguraci 3D skeneru bude vhodné koncipovat tak, aby umožnila pokrýt široké spektrum možností jeho testování. Nedílnou součástí 3D skeneru je také jeho softwarová část. Software 3D skeneru bude vytvořen ve výpočetním prostředí Matlab. Matlab představuje vhodný nástroj pro vytvoření skenovacího softwaru, protože je v akademické sféře velmi rozšířen, a navíc disponuje velkým množstvím různých knihoven a funkcí. Další výhodou je, že lze Matlab propojit se skenovacím hardwarem, a díky tomu je možné vytvořit ucelenou aplikaci pro ovládání hardwarové části 3D skeneru a části softwarové pro následnou analýzu nasnímaných dat.

Výše popsané zařízení zatím na ústavu konstruování chybí. Mým úkolem je tedy vyvinout 3D skener založený na metodě strukturovaného světla, který bude naprogramován ve výpočetním prostředí Matlab. Zatím budou použity základní kodifikační metody binárního a Grayova kódu. Využitím těchto metod bude odzkoušena funkčnost 3D skeneru a zjištěny případné nedostatky. Především se jedná o odzkoušení funkčnosti zvolené kalibrační metody, která je zásadní pro přesnost záznamu skenovaného objektu.

3.2 Vymezení cílů práce

Cílem diplomové práce je konstrukce 3D skeneru s využitím kamery Imaging Source a promítací jednotky DLP Lightcrafter.

3.2.1 Primární cíle

Primárním cílem diplomové práce je návrh konstrukce 3D skeneru a realizace softwarové části, která bude vytvořena v prostředí Matlab tak, aby bylo možné sledovat a náležitě upravovat jednotlivé kroky procesu 3D skenování objektů.

3.2.2 Dílčí cíle

- Konstrukce nosné části 3D skeneru
- Kalibrace kamery a projektoru
- Vytvoření scriptu na generování binárního a grayova kódu
- Dekódování proužkové projekce

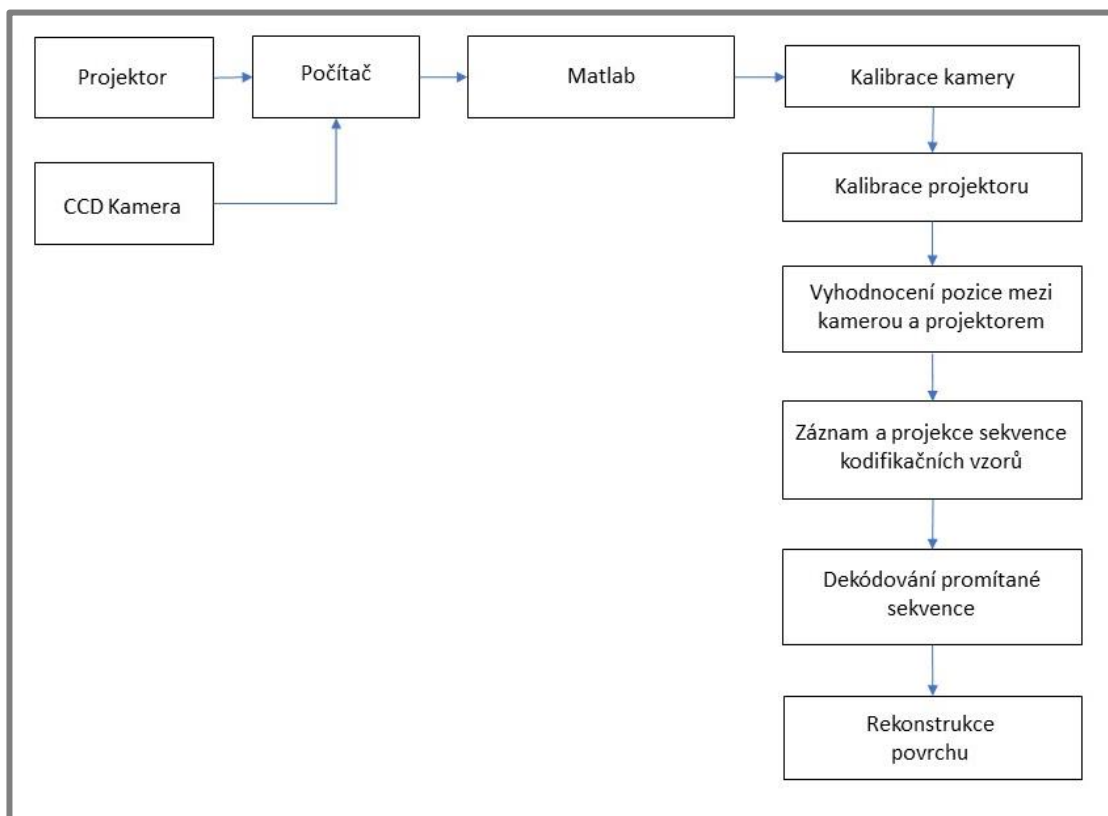
- Vytvoření mraku bodů a jeho filtrace
- Rekonstrukce povrchu objektu z mraku bodů
- Porovnání přesnosti 3D skeneru s komerčním 3D skenerem ATOS na zvolených referenčních objektech
- Sepsání uživatelského manuálu

Výstupem diplomové práce je funkční vzorek 3D skeneru.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Měřicí řetězec

Sestavu 3D skeneru tvoří projekční jednotka LightCrafter DLP3000 a kamera ImagingSource s CCD čipem. Oba komponenty jsou uloženy na stativové liště, která umožňuje posuv a natočení kamery vůči projektoru. Schéma měřicího řetězce včetně postupu softwarových metod je znázorněna na **Obr. 4-1**.



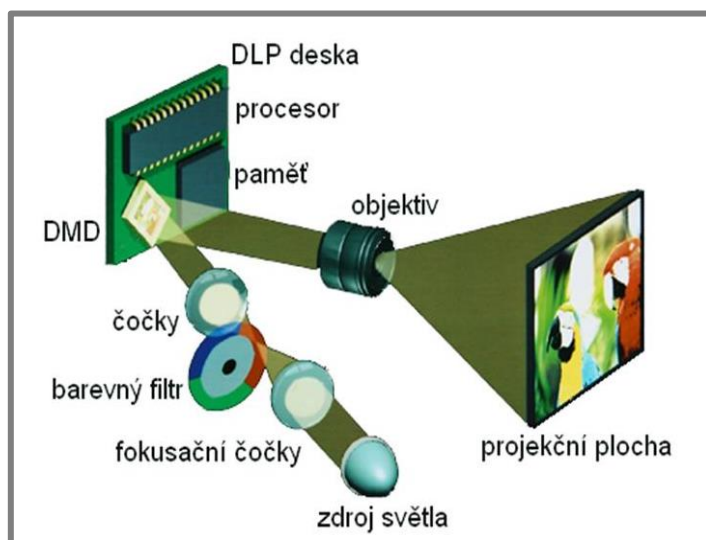
Obr. 4-1 Schéma měřicího řetězce včetně postupu softwarových metod

Projekční jednotka LightCrafter je připojena miniUSB kabelem počítači. Příkazy projekční jednotce z Matlabu jsou přenášeny pomocí virtuálního ethernetu. Kamera Imaging Source je rovněž připojena kabelem USB 3.0 přímo k počítači. S Matlabem komunikuje prostřednictvím adaptéru k Image Acquisition Toolboxu v Matlabu, který poskytuje volně výrobce kamery.

4.1.1 DLP projektor LightCrafterProjektor

4.1.1

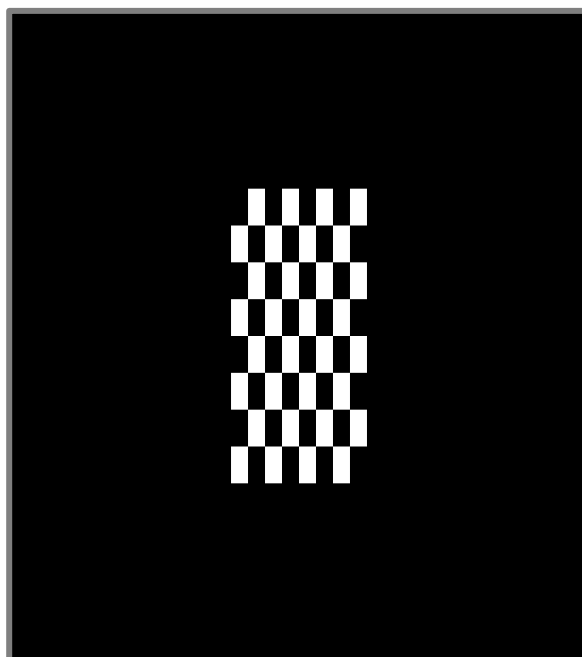
LightCrafter DLP3000 je založen na technologii DMD (Digital Micromirror Device) patentovaný firmou Texas Instruments. Čip tohoto typu projektoru je tvořen necelým půl milionem mikro zrcadel, které odrážejí světlo do požadovaného směru. Každé z těchto mikro zrcadel je zavěšeno na torzním závěsu, umožňujícím jeho natáčení. Schéma projektoru LightCrafter je ukázána na **Obr. 4-2**.



Obr. 4-2 Schéma projektoru LightCrafter [22]

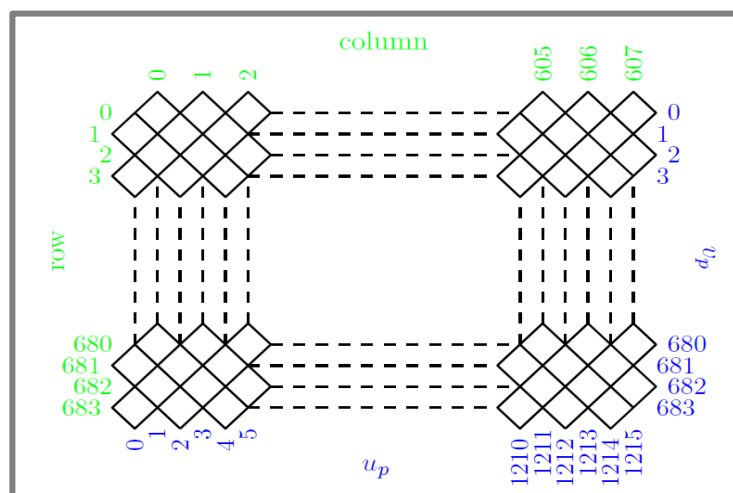
Pohyb jednotlivých zrcadel je řízen elektronikou systému nezávisle na ostatních. [22] Rozlišení projekční jednotky je dáno počtem mikro zrcadel v DLP čipu. Mikro zrcadla tedy představují jednotlivé pixely v promítaném obrazu. Za každým ze zrcadel se ukrývá buňka tvořená dvěma CMOS paměťovými elementy. [23]

Projektor LightCrafter disponuje netradičně členěnou pixelovou mřížkou, která není ortogonální, ale uspořádanou do diamantu viz. **Obr. 4-3**. Toto členění pixelové mřížky umožňuje zmenšení velikosti zástavbového prostoru mikro zrcadel DLP čipu. Projekční jednotka má nativní rozlišení 608 x 684 pixelů, ale poměr stran 16:9. Z toho rozložení vyplývá, že poměr stran nelze vypočíst pouhým sečtením zrcadel v horizontálním směru a vydělením počtem zrcadel ve směru vertikálním. Význam řad a sloupců tohoto rozdělení je tedy zásadně odlišný od rozdělení ortogonálního, protože je celé pixelové pole natočeno pod úhlem 45°.



Obr. 4-4 Šachovnicový vzor nahraný do projektoru

Toto rozdělení má zásadní vliv na podobu snímku nahraného do projekční jednotky. Použijeme-li snímek např. šachovnicový vzor, který je vytvořen v Matlabu, je možné do projektoru nahrát pouze snímky o rozlišení 608 x 684 pixelů ve formátu bmp. Pokud je vytvořen vzor o délce hrany čtverce např. 25 pixelů po nahrání do projekční jednotky se jeví jako zdeformovaný. Je proto nutné vytvořit vzor s obdélníky o délce strany 25 x 50 pixelů. Toto rozložení znázorňuje **Obr. 4-4**.



Obr. 4-3 Diamantové uspořádání pixelové mřížky. [31]

Takto připravený vzor se při promítnutí projektorem roztáhne na poměr stran 16:9 a šachovnice je již promítnuta jako čtverce se stejnou délkou hran. Tuto skutečnost lze

přičíst indexování pixelů z **Obr. 4-3**, kde je zeleně označeno nativní indexování pixelů a modře jsou označeny tzv. pseudopixelly.



Obr. 4-5 Projekční jednotka LightCrafter [32]

Projekční jednotka LightCrafter viz **Obr. 4-5** také disponuje svou vnitřní pamětí do, které lze nahrát snímky a potom je promítat v sekvencích velmi rychle za sebou. Projektor rovněž umožňuje využívat trigger ke spouštění kamery. K projekční jednotce je dodáván ovládací software od Texas Instruments. Jak již bylo zmíněno tento software nebude sloužit k ovládání 3D skeneru jako celku, ale lze ho využít při analýze zasílaných datových paketů do projektoru viz kapitola 0.

4.1.2 CCD kamera ImagingSource

4.1.2

Pro záznam objektu je využita CCD kamera DMK 23U168 – USB 3.0 viz **Obr. 4-6** od společnosti ImagingSource. CCD kamera disponuje rozlišením 640 x 480 pixelů a disponuje snímkovací frekvencí 120 fps. Kamera podporuje pouze monochromatický záznam, to znamená, že nelze testovat metody, které zahrnují kódovací schéma s využitím barevné projekce. Kameru lze spínat signálem odeslaným z projekční jednotky 3D skeneru a tímto je zajištěna synchronizace mezi kamerou a projektorem.



Obr. 4-6 Kamera ImagingSource [33]

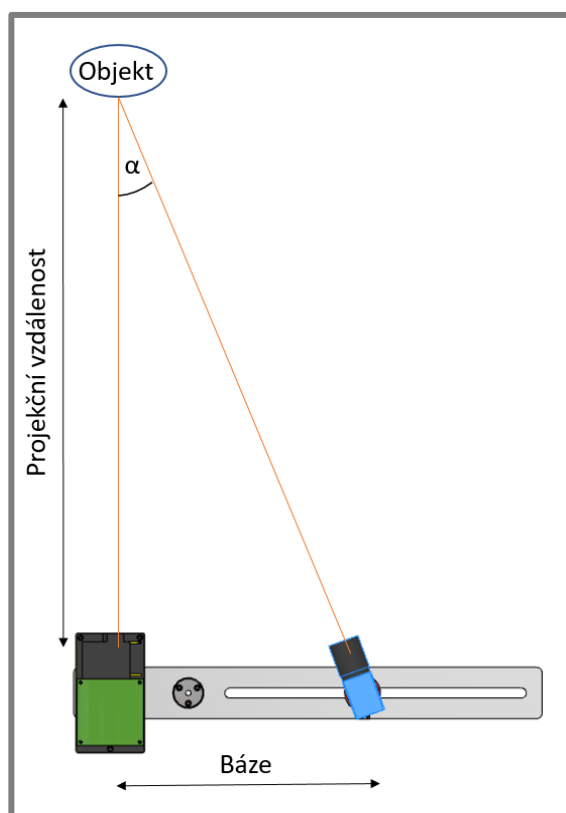
4.1.3 Stativová lišta 3D skeneru

Většina komerčních 3D skenerů má nastavenou pevnou vzdálenost mezi kamerou a projektorem. Důsledkem toho je, že nelze měnit velikost triangulačního úhlu a tím i velikost měřicího objemu bez výměny optiky 3D skeneru.

U experimentálních 3D skenerů je vhodnější, aby velikost triangulačního úhlu byla regulovatelná a to z důvodu testování optimální pozice mezi kamerou a projektorem při skenování širokého spektra objektů. Toho může být docíleno umístěním jednotlivých komponent na samostatný stativ nebo umístit sestavu skeneru na stativovou lištu pomocí níž lze měnit nastavení vzájemné pozice mezi kamerou a projektorem. Tato koncepce má i poměrně velkou nevýhodu, a to v časové náročnosti skenování, protože při každé změně pozice je nutné provést kalibraci optického systému. Tento typ skenerů není vhodný pro komerční použití, ale pro výzkumné a vzdělávací účely.

Pro návrh stativové lišty je potřeba nejprve identifikovat rozhodující parametry 3D skeneru. Projekční jednotka umožňuje projekci od vzdálenosti 364 mm do 2169 mm viz **Obr. 4-7**. Hodnota optimálního triangulačního úhlu α je v rozmezí 10° - 30° . Z těchto parametrů lze již jednoduše navrhnout rozmezí velikosti stativové lišty základě vzorce:

$$\tan \alpha = \frac{\text{Báze}}{\text{Proj vz.}}$$



Obr. 4-7 Návrh velikosti stativové lišty

Návrh velikosti stativové lišty je uveden v **Tab. 1**:

Tab. 1 Limitní hodnoty velikosti triangulační báze

Projekční vzdálenost [mm]	Triangulační úhel α [°]	Báze [mm]
364	10	64
364	30	210
2169	10	382
2169	30	1251

Z tabulky vyplývají limitní hodnoty pro velikost triangulační báze. S ohledem na kompaktní rozměry sestavy 3D skeneru byla navržena velikost báze v rozmezí od 125 mm do 390 mm.

4.2 Komunikace mezi PC a projektorem LightCrafter

Projekční jednotka LightCrafter běží na vloženém linuxovém jádru. Komunikace mezi PC a projektorem je zajištěna USB kabelem. K provozu projektoru je potřeba mít stažený ovladač síťového adaptéru RNDIS. Jakmile je projektor připojen k počítači prostřednictvím USB kabelu LightCrafter se přihlásí jako zařízení virtuálního ethernetu.

Počítači je na virtuální síti přiřazena IP adresa 192.168.1.99 a Lightcrafteru IP adresa 192.168.1.100. Výměna dat probíhá prostřednictvím protokolu RNDIS zasíláním zpráv ve formě paketů (balíčků). [24]

4.2.1 Příkazové pakety

Všechny příkazy zasílané z počítače do projektoru a odeslané z projektoru jsou ve formě paketů. Každý odeslaný příkaz z počítače je potvrzen paketem odezvy projektoru. Host (počítač) musí vždy vyčkat na paket odezvy předtím, než je zaslán další příkazový paket. Pouze host může zahájit přenos paketu. Příkazový paket obsahuje 6 bytovou hlavičku, datovou část o variabilní délce a kontrolní byte. Tato struktura je znázorněna na **Obr. 4-8**. [24]

HEADER						DATA	CHECKSUM
Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6 .. Byte N	Byte (N+1)
Packet Type	CMD1	CMD2	Flags	Payload Length		Data Payload	Checksum

Obr. 4-8 Struktura příkazového paketu [24]

Typy paketů

První byte v hlavičce paketu definuje jeho typ. Např. zda se jedná o paket odezvy projektoru, příkazový paket hosta nebo chybový paket projektoru. [24]

ID příkazu (CMD1 & CMD2)

Byty CMD1 a CMD2 tvoří unikátní identifikační kód každého příkazu. CMD1 definuje hlavní číslo příkazu a CMD2 popisuje číslo pod příkazem. [24]

Délka paketu

Byty L1 a L2 reprezentují délku paketu bez bytu kontrolního součtu. L1 odpovídá LSB (Least Significant Byte) zatímco L2 odpovídá MSB (Most Significant Byte) [24]

Datová část

Byty datové části se vztahují vždy k aktuálnímu příkazu. Datová délka a její obsah se mohou měnit příkaz od příkazu, avšak maximální délka datové části je 65 535 bytů ($2^{16} - 1$). [24]

Kontrolní součet (checksum)

Poslední bytem paketu je tzv. kontrolní součet (checksum). Tento byte slouží k ověření integrity příkazového paketu. Výpočet kontrolního součtu [24]:

$$S \text{ modulo } 256 = X$$

S...Součet bytů aktuálního paketu bez bytu kontrolního součtu

X...Hodnota kontrolního bytu

Příkazové vlajky (Command Flags)

Hodnota tohoto bytu udává, zda datová část paketu je odeslána najednou nebo po částech. Byty příkazové vlajky mají využití především při nahrávání snímků, které mají velikost větší než 65 535 bytů do paměti projektoru. [24]

4.2.2 Knihovna pro ovládání projektoru**4.2.2**

Příkazy posílané do projektoru z počítače, a naopak mají podobu strojového kódu. Aby bylo možné ovládat projektor prostřednictvím Matlabu bylo nutné najít nebo vytvořit nástroj, který umožňuje skládat zasílané byty do podoby výše zmíněných paketů. Takový nástroj představuje knihovna od J. Wintera z TU Berlín stažená z Git Hubu [25]. Tato knihovna je naprogramována technikou objektově orientovaného programování a umožňuje skládání příkazových paketů. Do knihovny bylo přidáno několik funkcí, které umožňují promítání projekčních vzorů v sekvencích a také byla přidána možnost využít hardwarového spínání kamery. Funkce knihovny spočívá především v přípravě příkazových paketů, které mají podobu funkcí. Tyto funkce jsou potom volány a plněny argumenty z vytvořeného grafického prostředí.

Základní potřebné funkce pro ovládání projekční jednotky:

- Nahrání snímků do projektoru. Nahrání každého snímku probíhá po částech díky omezení velikosti zasílaných dat prostřednictvím příkazového paketu.
- Spuštění a vypnutí snímkové sekvence nahrané v projekční jednotce

4.2.3 GUI pro ovládání projektoru**4.2.3**

Z důvodu jednoduchosti a přívětivosti ovládání 3D skeneru bylo také zapotřebí vytvořit grafické uživatelské prostředí v Matlabu. GUI (Graphic User Interface) prostředí znamená vytvoření aplikace, kde jsou jednotlivé parametry a příkazy realizovány klikáním na tlačítka, popřípadě doplňováním editačních polí atd. Z grafického prostředí jsou tedy volány jednotlivé funkce z knihovny pro ovládání projektoru a také volány vstupní argumenty jednotlivých funkcí. GUI bylo rovněž programováno metodou objektově orientovaného programování, kdy bylo využito dědičnosti s knihovnou funkcí projektoru, která je pro tuto metodu typická.

GUI pro projekční jednotku bylo také připraveno pro implementaci funkcí k ovládání kamery a vzájemné synchronizace mezi sebou. Tento aspekt byl důležitý pro zkvalitnění uživatelského pohodlí, kdy již nebylo nutné spouštět další okna aplikací na pozadí.

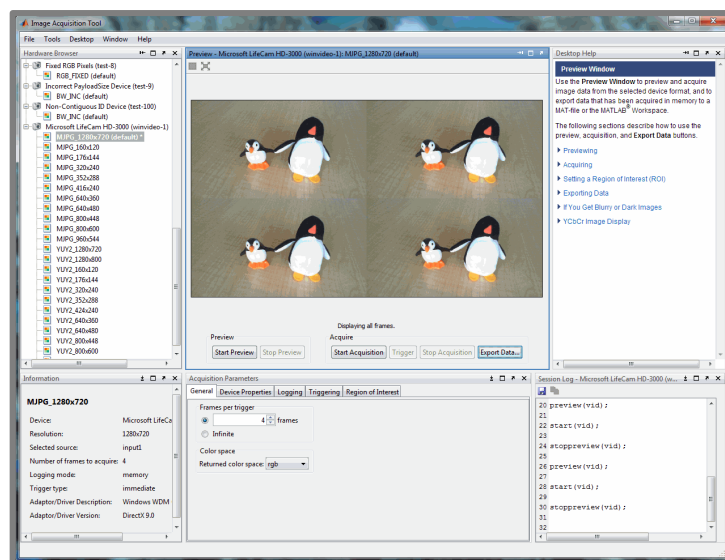
4.3 Komunikace mezi PC a kamerou

Kamera ImagingSource je rovněž ovládána z Matlabu. Programování ovládání kamery je ve srovnání s projektorem podstatně jednodušší, protože výrobce kamery poskytuje plugin, pomocí kterého lze ovládat kameru prostřednictvím Image Acquisition Toolboxu v Matlabu viz **Obr. 4-9**.

Image acquisition toolbox (Imaq) umožňuje ovládání z programátorského prostředí nebo pomocí svého nástroje (toolu) v podobě grafické uživatelské aplikace. V diplomové práci bude využíváno ovládání z naprogramovaného prostředí, aby mohlo být ovládání kamery spojeno s aplikací na ovládání projektoru. Tvorba skriptu pro ovládání se skládá z několika základních kroků [25]:

- Instalace adaptéru kamery pro Imaq toolbox.
- Vytvoření vstupního video objektu, který reprezentuje spojení mezi Matlabem a kamerou. Prostřednictvím tohoto objektu lze nastavit požadované parametry kamery a kontrolovat mnoho aspektů procesu snímání (triggering, frame grabbing atd.).
- Vytvoření náhledu předtím, než započne snímání jednotlivých snímků. Náhled je výhodné použít pro optimalizaci nastavení parametrů kamery a nastavení její vhodné pozice.
- Konfigurace vlastností video objektu. Zejména se jedná o nastavení formátu záznamu, typu triggeru, periody triggeru, fyzických vlastností kamery.
- Zahájení snímání dat. Tento krok má tři fáze. První fází je spuštění snímání kamery. Jedná se o přípravu zařízení na záznam dat. V druhé fázi dochází k záznamu jednotlivých snímků spuštěním triggeru kamery. Poslední fází je přenos zachycených dat, která jsou uloženy v paměťovém bufferu do prostředí Matlabu.

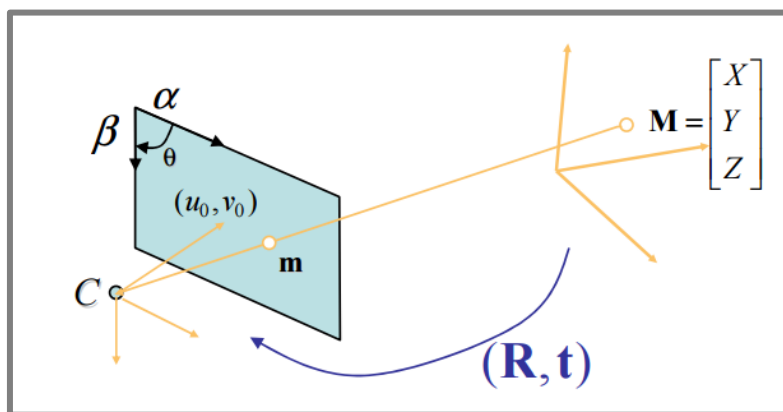
Naprogramované funkce pro ovládání kamery jsou volány ze společného GUI pro ovládání projektoru.



Obr. 4-9 Imaq tool v Matlabu [25]

4.4 Kalibrace kamery

Kalibrace kamery je realizována Zhangovou metodou využitím Camera Calibration Toolboxu od J. Y. Bugueta. Tento toolbox využívá drtivá většina experimentálních 3D skenerů. Kamera je modelována jako pin hole (dírková komora) s centrálním promítáním viz **Obr. 4-10**.



Obr. 4-10 Pin hole model kamery [26]

4.4.1 Zhangova metoda

4.4.1

Zhangova metoda vychází z analyzování šachovnicového vzoru na rovinné desce, která je snímána z různých úhlů pohledů. Rovinná deska s kalibračním vzorem je volně natáčena a posouvána ve scéně, přičemž není nutné znát její jednotlivé pozice. Kalibrace touto metodou je možná již při pořízení pouhých dvou snímků, ale přesnějších výsledků je dosaženo pro $n \geq 3$, kde n udává počet snímků. Velmi přesných výsledků je dosaženo pro $n = 18$. [13]

Základní rovnice

2D bod v rovině snímku je označen jako $m = [u, v]^T$. Tento bod v rovině vytvoříme vedeme-li optický paprsek z 3D bodu $M = [X, Y, Z]^T$ do centra projekce kamery C průnikem rovinou snímku. Aby byly umožněny výpočty je nutné rozšířit body m a M připsáním 1 na poslední místo vektoru souřadnic. Nyní dostáváme pro bod v rovině snímku $\tilde{m} = [u, v, 1]^T$ a pro bod v prostoru $\tilde{M} = [X, Y, Z, 1]^T$. Vzájemný vztah mezi bodem M a jeho projekcí m v rovině snímku je dána:

$$s\tilde{m} = A[R \ t]\tilde{M} \quad (1)$$

kde s vyjadřuje faktor měřítka, (R, t) jsou tzv. vnější parametry systému, kde R je maticí rotace a t vektor translace, které udávají vztah mezi globálním a lokálním souřadným systémem. A představuje matici vnitřních parametrů optiky a je dána:

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$P = A[R \ t], \quad (3)$$

kde (u_0, v_0) představují centrální bod (principal point) v rovině snímku, α a β označují měřítko podél os roviny snímku u a v . γ označuje jaký úhel svírají osy u a v . Jestliže $\theta = 90^\circ$ potom $\gamma = 0$, což z fyzikálního hlediska znamená, že pixely kamery jsou dokonale ortogonální. Matice P o velikosti 3×4 se nazývá projekční matice kamery a obsahuje v sobě vnitřní a vnější parametry optického systému. [26]

Rovnice homografie

Předpokládejme, že modelová rovina leží ve světových souřadnicích $Z = 0$. Tzn. bod \tilde{M} leží v rovině Z . Potom dostaneme rovnici (1) ve tvaru:

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Členy r_i vyjadřují jednotlivé sloupce rotační matice R . Člen r_3 je opomenut, protože odstraněním souřadnice Z ztratil význam. Body M a m jsou nyní ve vztahu danou maticí homografie H :

$$s\tilde{m} = H\tilde{M}, \quad (5)$$

$$H = A \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \quad (6)$$

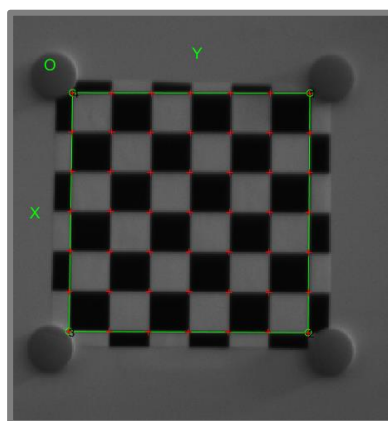
Řešením matice homografie H potom dopočítáme projekční transformaci mezi obrazovými body \tilde{m} v n rozdílných snímcích. Poté jsou v uzavřené formě (closed-form solution) rekonstruovány vnitřní a vnější parametry optického systému.

Konečná nelineární minimalizace reprojekční chyby je vyřešena užitím Levenberg-Marquardovi metody. [26]

4.4.2 Ovládání kalibračního tooboxu

Při kalibraci kamery využitím Camera Calibration Toolboxu v Matlabu je nutné postupovat podle následujících kroků:

- Nahrát kalibrační snímky ve formátu bmp do složky s kalibračním toolboxem
- Zadat název snímků např. Image, které budou načteny do paměti
- Dalším krokem je extrakce rohů šachovnicového vzoru. Volíme, zda si přejeme provést extrakci ze všech kalibračních snímků. V dalším kroku nastavíme velikost okna vyhledávače rohů šachovnice (corner finder) a zvolíme, zda chceme využít automatické vyhledávání rohů šachovnicového vzoru. Provedeme výběr hranic šachovnicového vzoru viz. **Obr. 4-11**. Zadáme velikost hrany dx a dy čtverce šachovnicového vzoru. Stejný postup provedeme pro všechny kalibrační snímky.
- Nyní provedeme kalibraci kamery Zhangovou metodou.
- Po úspěšně provedené kalibraci toolbox umožňuje zobrazit radiální zakřivení čočky kamery, vzájemnou pozici mezi globálním (šachovnicový vzor) a lokálním (kamera) souřadným systémem a také zobrazit tzv. reprojekční chybu kalibrace
- Výsledky kalibrace lze následně exportovat do pracovního prostředí Matlabu.

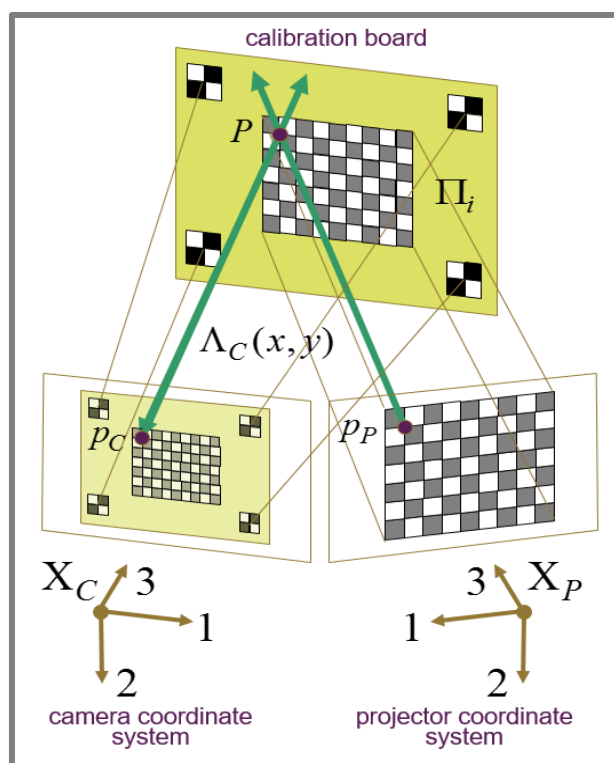


Obr. 4-11 Výběr hranic šachovnicového vzoru

4.5 Kalibrace projektoru

4.5

Projektor i kameru lze popsat stejným matematickým modelem dírkové komory. V tomto modelu představuje projektor inverzní kameru, která obraz nezachycuje, ale promítá. Kalibrace projektoru je tedy podobná kalibraci kamery. Ke kalibraci projektoru využívám metodu navrženou D. Lannmanem [3]. Metoda spočívá v promítnutí nám známého vzoru šachovnice na kalibrační desku s terčíky viz **Obr. 4-12**. Nejprve pomocí terčíků, jejichž vzájemnou pozici musíme znát, zjistíme rovnici



Obr. 4-12 Schéma kalibrace projektoru [3]

kalibrační roviny v souřadném systému kamery. V dalším kroku jsou detekovány rohy promítnutého šachovnicového vzoru. K rekonstrukci 3D pozice promítnutých rohů metoda využívá průsečíku optického paprsku z centra projekce kamery s kalibrační rovinou. Posledním krokem je kalibrace projektoru využitím 3D-2D korespondentů. 2D korespondenty je možné obdržet extrahováním rohů promítnutého vzoru za předpokladu, že kalibrační snímek má stejné rozlišení jako projektor. Další možností je použít syntetický vzor (vytvořený v Matlabu) v rozlišení projektoru a extrahovat jeho rohy k určení souřadnic v pixelech. [27]

4.6 Projekce strukturovaného světla

Diplomová práce využívá binární a Grayovu projekci strukturovaného světla viz **Obr. 4-13**. Binární a Grayův vzor je výhodné vytvořit v prostředí Matlab, protože lze generovat snímky s různou bitovou hloubkou. Snímky jsou v Matlabu reprezentovány v podobě matice, jejíž prvky jsou tvořeny pixely snímku. Hodnoty jednotlivých prvků u monochromatických snímků obvykle představují hodnoty velikosti světelné intenzity pixelů.

4.6.1 Binární a Grayův kód

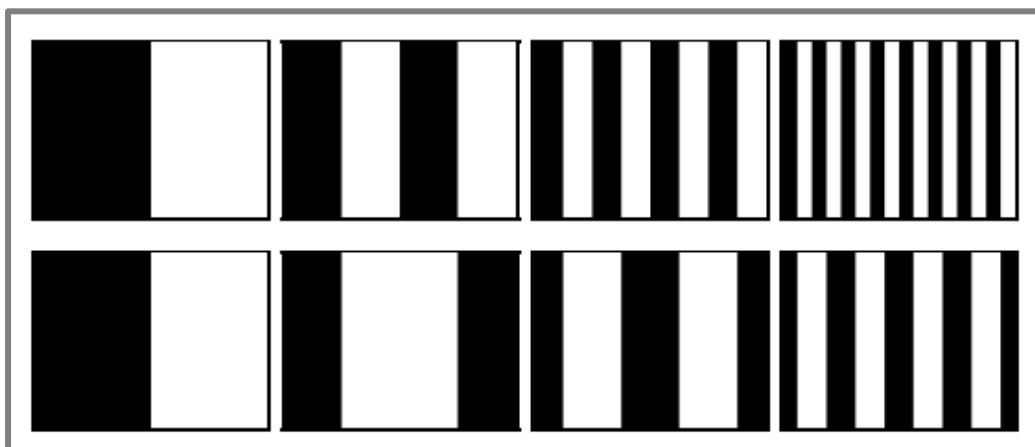
Binární kodifikace je založena na promítání kontrastních pruhů obvykle bílé a černé barvy přes měřený povrch objektu. Binární kodifikace spadá pod metody temporární kodifikace. Každému bodu snímku je přiřazeno unikátní kódové slovo. Délka slova je závislá na požadovaném rozlišení promítané sekvence podle vztahu $2^n = \text{rozlišení}$. Z toho vyplývá, že pro rozlišení 1024 pixelů je nutné vytvořit sekvenci 10 snímků. Je tedy nutné vytvořit skript v Matlabu, který vygeneruje sekvenci vzorů o požadovaném rozlišení. Popis popsaného skriptu:

- Ze vstupních argumentů byl vypočten počet potřebných snímků ke kodifikaci podle $\log_2 = \text{rozlišení projektoru}$
- Počet snímků byl zaokrouhlen nahoru na celé číslo
- Byl vypočten posun vzoru tak, aby byl vycentrován do středu projekce vztahem $\text{posun} = ((2^{\text{počet snímků}}) - \text{rozlišení})/2$
- Dále byla využita funkce *dec2bin* k převodu hodnot rozlišení do binární soustavy pro každý snímek
- Výstupem funkce *dec2bin* byly textové řetězce, které bylo nutné převést na čísla
- Další částí skriptu bylo rozšíření vygenerovaného binárního kódu na rozlišení projektoru funkcí *repmat*
- Poslední částí je vycentrování promítaného vzoru využitím hodnot vypočteného posuvu vzoru

Grayův kód lze vytvořit z kódu binárního následující operací:

$$G(i) = B(i - 1) \text{ xor } B(i)$$

kde i udává pořadí snímku v sekvenci. Dekódování projekce potom spočívá v hledání korespondenčních bodů (podle kódovacího slova) projektoru ve snímku pořízeném kamerou. [3]



Obr. 4-13 Ukázka binárního a Grayova kódu [3]

K dekódování binárního a Grayova kódu lze využít více přístupů. Jedním z nich je vygenerování prvních dvou snímků, které jsou pouze bílé a černé, protože je nutné analyzovat světelnou intenzitu pixelů na povrchu objektu. Následující snímky sekvence jsou již tradiční viz **Obr. 4-13**. Tyto snímky jsou porovnávány s oběma referenčními snímky a na základě hodnoty světelné intenzity je oblastem snímku přiřazena logická 1 a 0 . Při porovnávání snímku je rovněž důležité určit hodnotu minimálního kontrastu mezi pruhy bílé a černé barvy. Zavedeme tedy minimální hodnotu kontrastu světelné intenzity, aby se předešlo chybě v přiřazení logické 1 a 0 k pixelu snímku. Pixely, u kterých hodnota kontrastu světelné intenzity bude pod minimální hodnotou budou vyřazeny z rekonstrukce. [3]

Dalším přístupem je využití promítání inverzních vzorů. Tato metoda využívá promítnutí klasického vzoru viz **Obr. 4-13** a za ním vzoru inverzního. Inverzní vzor má prohozenou pozici mezi bílými a černými oblastmi snímku. Při dekódování jsou mezi sebou snímky porovnány a lze tedy přesně říct, kde se nachází osvětlená a neosvětlená oblast snímku. Na skenovaném objektu se nachází oblasti, které jsou ve stínu. Proto je nutné tyto oblasti odstranit z výsledné rekonstrukce. To se provede opět určením hodnoty minimálního kontrastu světelné intenzity. [3]

Poslední částí dekódování projekce je přiřazení pozice jednotlivým pixelům. Vyhodnocená sekvence porovnává kódová slova všech pixelů s kódovými slovy syntetické sekvence. Díky tomu je možné přiřadit přesnou pozici promítaným pixelům v pixelové mřížce projektoru, protože samotné dekódování je realizováno z pořízených snímků kamery tzn. v její pixelové mřížce, která se velikostně od pixelové mřížky projektoru liší. Finální výsledek dekódování je vhodné zobrazit v barevné mapě, kde je znázorněno pořadí pixelů v horizontálním a vertikálním směru.

4.7 Rekonstrukce povrchu

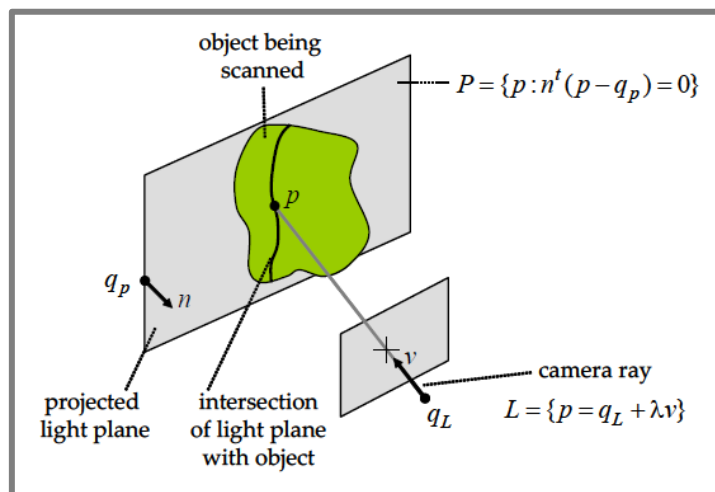
Rekonstrukce povrchu je posledním krokem v procesu zaznamenání tvaru skenovaného objektu. V první části rekonstrukce je potřeba vytvořit tzv. mrak bodů. Mrak bodů je množina bodů v 3D prostoru, která je vypočítána na základě parametrů z kalibrace optického systému a dekódování projekce. Z kalibrace optického systému dostaneme informace o nastavení, distorzích čočky a vzájemné pozice mezi kamerou a projektorem. Z dekódování obdržíme informace o posunu promítaného vzoru vlivem geometrie tělesa.

V další části je potřeba mrak bodů filtrovat, protože obsahuje množství chybně určených bodů (např. vlivem odlesků na povrchu objektu) a také body, které reprezentují okolí skenovaného objektu (např. podlaha, okolní stěny aj.).

Z uspořádaného a patřičně upraveného mraku bodů je již možné přistoupit k vytvoření povrchu skenovaného tělesa. Povrch skenovaného objektu je obvykle tvořen polygonální sítí, kterou lze vytvořit užitím Delaunayovy triangulace a dalších polygonizačních metod.

4.7.1 Vytvoření mraku bodů

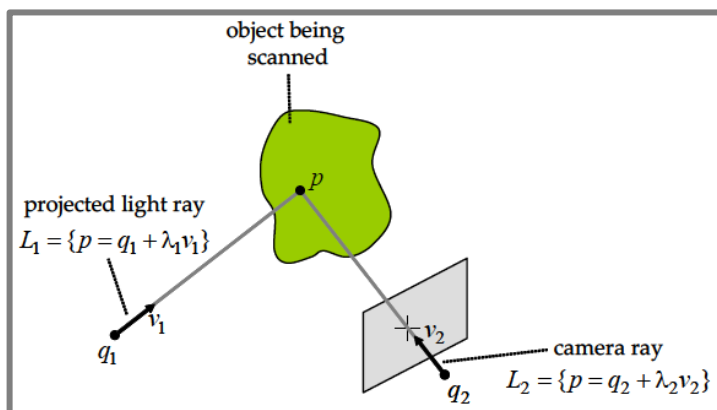
Mrak bodů je vytvořen na základě znalosti parametrů kalibrace optického systému 3D skeneru a dekódované sady korespondentů kamery a projektoru. Metody stojící za samotnou rekonstrukcí se nazývají triangulace optický paprsek – rovina a triangulace optický paprsek – optický paprsek. V první části jsou triangulovány body ze sloupcových a řádkových korespondentů metodou triangulace optický paprsek – rovina viz **Obr. 4-14**. Triangulace optický paprsek-rovina určuje průsečík světelné



Obr. 4-14 Triangulace optický paprsek – rovina [3]

roviny a optického paprsku kamery. Světelná rovina je definována v implicitním tvaru, zatímco optický paprsek kamery je ve tvaru parametrickém. Na skenovaném objektu je rovina reprezentována křivkou, která je zakřivená vlivem geometrie tělesa. Tato křivka obsahuje množství bodů, jejichž pozice jsou definovány optickým paprskem kamery. [3]

V další části je využita triangulace optický paprsek – optický paprsek viz **Obr. 4-15**.



Obr. 4-15 Triangulace optický paprsek – optický paprsek [3]

Před triangulací je nutné konvertovat měřené body z pixelových souřadnic na optický paprsek kamery a projektoru, které jsou definovány v souřadném systému kamery. Poté jsou vyhledány korespondenční pixely mezi kamerou a projektorem, které definují měřený bod. Vyhledávání korespondenčních pixelů je založeno na tom, že známe kódová slova pixelů vytvořené sekvence. Tato kódová slova jsou poté vyhledána na snímcích z kamery. Po nalezení shodných pixelů je využita konverze na optický paprsek, která vyhledá nejbližší možný průsečík obou paprsků. Je to z důvodu, že optické paprsky se nemusí přesně protnout. Proto je zde zavedena aproximační funkce, která určí nejbližší možný bod průsečíků obou optických paprsků metodou nejmenších čtverců. Poslední částí je vizualizace mraku bodů, který je tvořen množinou bodů vzniklých výpočtem průsečíku optických paprsků kamery a projektoru.

4.7.2 Filtrace mraku bodů

4.7.2

Výsledný mrak bodů obvykle obsahuje značné množství nechtěných nebo chybných bodů. Mezi nechtěné body lze např. považovat podstavec nebo podložku skenovaného objektu. Chybné body vznikají v důsledku chyb při dekodování např. vlivem světelných odlesků.

K filtraci nechtěných bodů lze využít filtraci pomocí rovin. Roviny jednoduše ořezou z mraku bodů části, které nejsou součástí skenovaného objektu. K tomu je potřeba mít mrak bodů zobrazený v souřadném systému, aby bylo možné definovat pozice jednotlivých rovin. Další částí filtrace je odstranění roztroušených bodů okolo skenovaného objektu. To lze provést využitím integrované knihovny v Matlabu 3D Point Cloud Processing. Tato knihovna obsahuje příkaz *pcdenoise*, která odstraní šum v okolí skenovaného objektu.

4.7.3 Polygonizace mraku bodů

4.7.3

Poslední částí rekonstrukce objektu je polygonizace mraku bodů. Polygonizaci je potřeba provést na přefiltrovaném mraku bodů.

Před samotnou polygonizací je potřeba mrak bodů předzpracovat užitím Delaunayovy triangulace. Delaunayova triangulace optimálně rozdělí 3D prostor na soubor

tetrahedronů. Vytvořené tetrahedrony slouží jako vstupní data pro polygonizační algoritmus Alpha Shapes. Algoritmus Alpha Shapes prochází jednotlivé tetrahedrony a odstraní ty, jejichž vrcholy se nevejdou do opsané koule o poloměru, který definuje parametr α . Výhodou algoritmu AlphaShapes je, že dokáže rekonstruovat povrch u objektů, která nemají uzavřený objem nebo obsahují díry. Algoritmus AlphaShape byl stažen z fóra MathWorks [29].

5 VÝSLEDKY

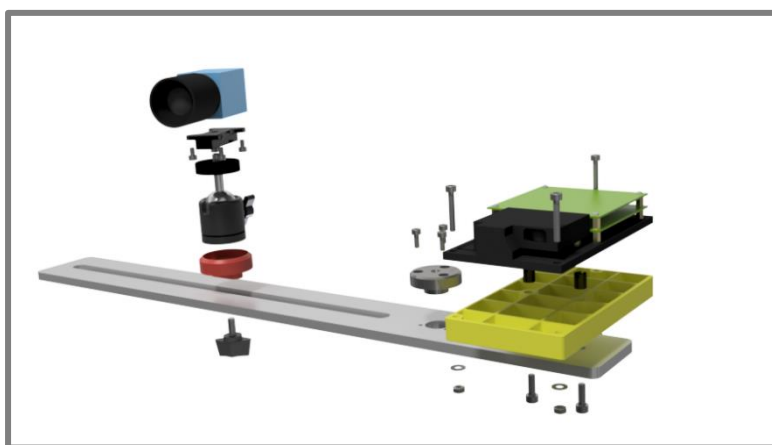
5

5.1 Konstrukce stativu 3D skeneru

5.1

Byl navržen a vyroben stativ 3D skeneru. Stativ je velmi jednoduché konstrukce, která ovšem plně dostačuje potřebám měření a také umožňuje testovat různé konfigurace 3D skeneru. Komponenty skeneru jsou umístěny na stativové liště, která umožňuje nastavit vzdálenost mezi kamerou a projektorem v rozsahu *125 mm* až *390 mm*. Kamera je umístěna na adaptéru s kulovým kloubem, aby byla zajištěna volnost pro správné natočení kamery do scény.

Virtuální rozpad sestavy 3D skeneru je zobrazen na **Obr. 5-2**. Celkový pohled na sestavu 3D skeneru se stativem viz **Obr. 5-1**.



Obr. 5-2 Rozpad sestavy 3D skeneru



Obr. 5-1 Sestava 3D skeneru se stativem

5.2 Výsledky ukázkového 3D skenování

5.2.1 Výsledky kalibrace kamery

Kalibrace kamery byla provedena pomocí 15 snímků kalibrační desky, které byly snímány v různých pozicích vůči kameře viz **Obr. 5-3**. Jednotlivé snímky zobrazují šachovnicový vzor. Kalibrace kamery zahrnuje výpočet vnitřních a vnějších parametrů kamery.

Vnitřní parametry kamery:

Ohnisková vzdálenost:

$$f_c = [1435.3 \quad 1435.1] \pm [9.14 \quad 8.96]$$

Centrální bod:

$$c_c = [307.17 \quad 242.34] \pm [7.95 \quad 7.17]$$

Zkosení:

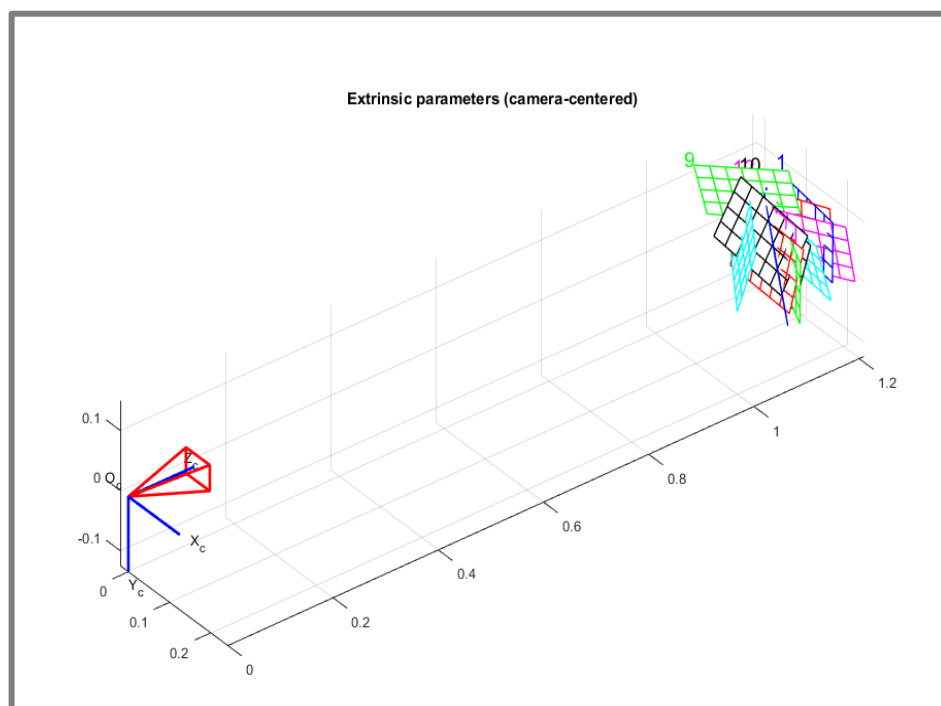
$$\alpha_c = [0.00] \pm [0.00] \Rightarrow \text{úhel mezi osami pixelů} = 90.00 \pm 00 \text{ stupňů}$$

Zakřivení:

$$k_c = [-0.3385 \quad -1.3905 \quad -0.00039 \quad -0.0035 \quad 0.00]$$

Chyba pixelu:

$$\text{err} = [0.21 \quad 0.16]$$



Obr. 5-3 Zobrazení pozic kalibrační desky vůči souřadnému systému kamery

5.2.2 Výsledky kalibrace projektoru

5.2.2

Kalibrace projektoru byla provedena stejně jako u kalibrace kamery pomocí 15 snímků a modifikovanou Zhangovou metodou. Tato metoda byla modifikována v roce 2009 Lanmannem a Taubinem [3].

Vnitřní parametry projektoru:

Ohnisková vzdálenost:

$$f_c = [1230.4 \quad 2.116.8] \pm [8.92 \quad 15.35]$$

Centrální bod:

$$c_c = [307.17 \quad 242.34] \pm [5.41629 \quad 13.45563]$$

Zkosení:

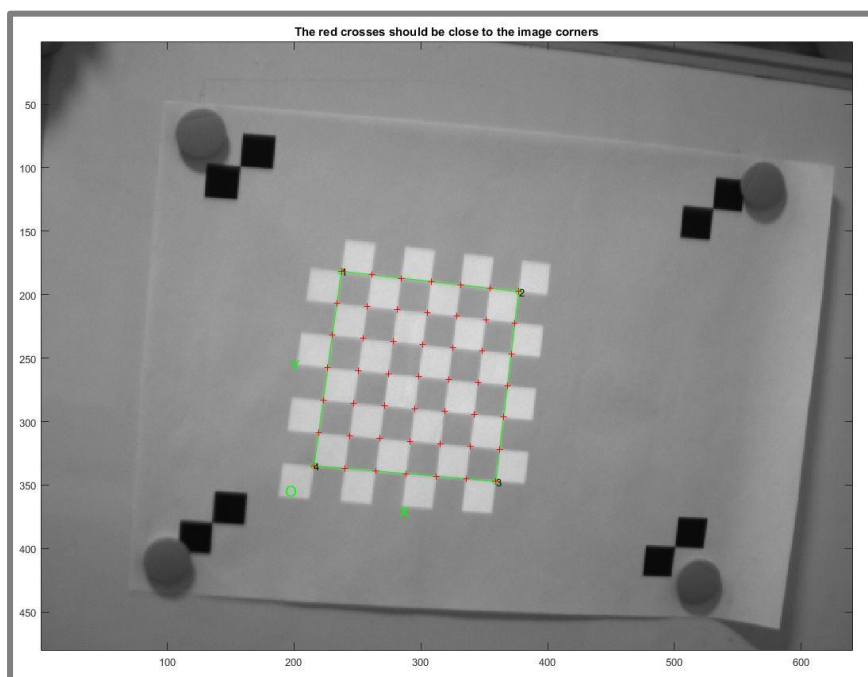
$$\alpha_c = [0.00] \pm [0.00] \Rightarrow \text{úhel mezi osami pixelů} = 90.00 \pm 00 \text{ stupňů}$$

Zakřivení:

$$k_c = [-0.6531 \quad - \quad 28.56 \quad -0.075 \quad 0.0067 \quad 0.00]$$

Chyba pixelu: $\text{err} = [0.379670.39640]$

Při kalibraci projektoru byli rovněž využity funkcionality výše zmíněného toolboxu. Postup kalibrace projektoru je podobný jako u kamery, ale s rozdílem, že extrakce rohů šachovnicového vzoru je provedena z promítnuté šachovnice a nezáleží na velikosti promítnutého pole šachovnice, protože se mění ze vzdáleností od projektoru. Jak již bylo zmíněno dříve, projektor nemá ortogonální mřížku je tedy nezbytné upravit promítanou šachovnici tak, aby při promítnutí měla pole v podobě rovnostranných čtverců. Na **Obr. 5-4** je znázorněna extrakce rohů promítnuté šachovnice. Extrakce rohů byla provedena proti směru hodinových ručiček. Na kalibrační desce je zároveň



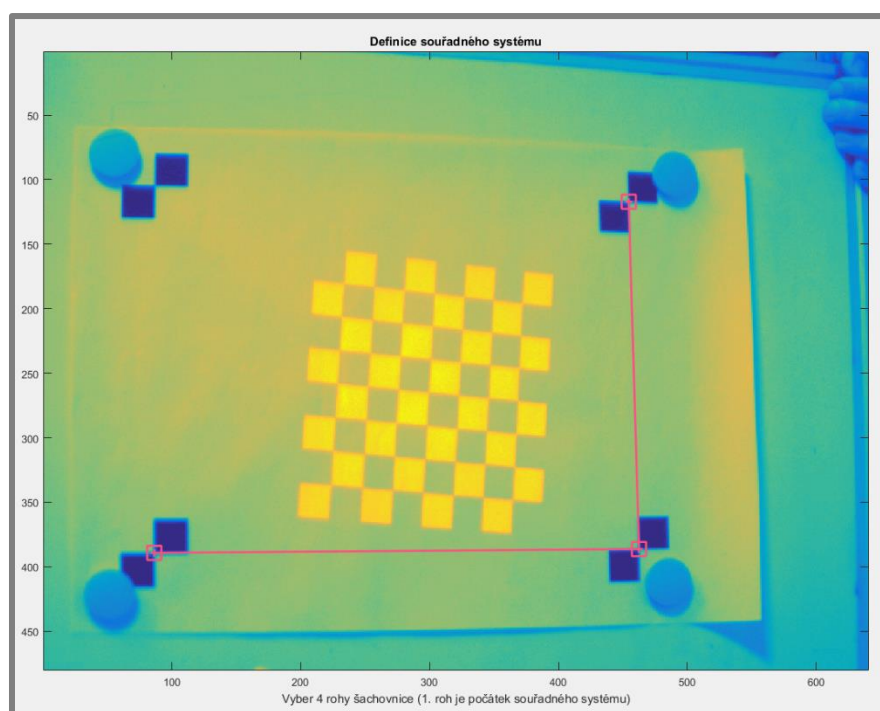
Obr. 5-4 Extrakce rohů promítnuté šachovnice při kalibraci projektoru

potřeba mít natištěné kalibrační targety, aby bylo možné dopočítat vzájemnou pozici mezi kamerou a projekční jednotkou.

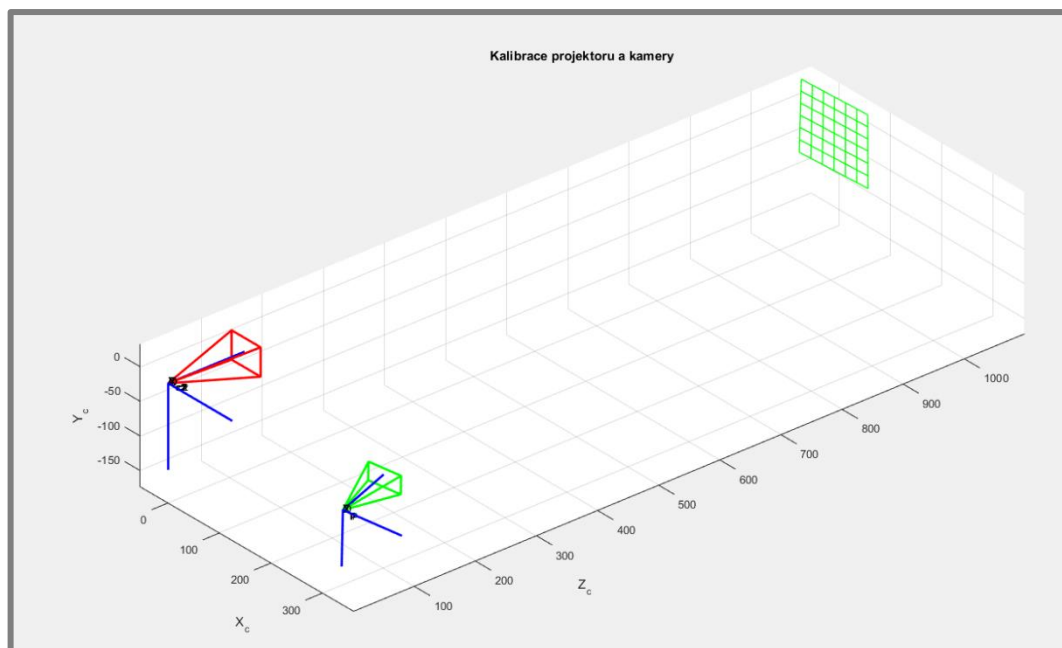
5.2.3 Výsledky kalibrace optického systému

Kalibrace optického systému je posledním krokem, který je zásadní pro výpočet pozice mezi kamerou a projekční jednotkou. Skript, který obstarává výpočet kalibrace pracuje s daty, které byly pořízeny extrakcí rohů šachovnice kamery a projektoru. Postup kalibrace je následující:

- Zadání vzdálenosti mezi středy kalibračních targetů
- Nahrání dat z extrakce rohů šachovnice
- Extrakce rohů z kalibračních targetů opět proti směru hodinových ručiček viz **Obr. 5-5**
- Vytvoření syntetického snímku šachovnice
- Výpočet pozice mezi kamerou a projektorem
- Zobrazení kalibračních výsledků viz **Obr. 5-6**
- Uložení kalibračních výsledků *calib_cam_proj.mat* do složky s kalibračními výsledky



Obr. 5-5 Extrakce rohů kalibračních targetů



Obr. 5-6 Vzájemná pozice mezi projektorem a kamerou pro první snímek kalibrace

5.2.4 Volba referenčních objektů

5.2.4

Pro porovnání byly vybrány dva referenční objekty, které se lišily nejen svým tvarem, ale také jiným materiálem s rozdílnými optickými vlastnostmi zejména albedem (odrazivost povrchu). Ke skenování byly využity dva různé měřicí objemy z důvodů rozdílné velikosti referenčních objektů. Prvním zvoleným referenčním objektem byla papírová krabice viz **Obr. 5-7**.



Obr. 5-7 Referenční objekt – krabice

Byla zvolena z důvodu svých pravidelných tvarů a přívětivých optických povrchových vlastností. Tento „ideální“ skenovací objekt měl především sloužit k porovnání přesnosti rekonstrukce, protože rovinné tvary jsou snadněji měřitelné, a také by na povrchu objektu nemělo docházet k chybám dekodování vlivem odlesků, nedostatečného kontrastu apod.

Druhým měřeným objektem byl zvolen model sněžného skútru vyhotoveného z modelářské hlíny viz **Obr. 5-8**.



Obr. 5-8 Referenční objekt – sněžný skútr

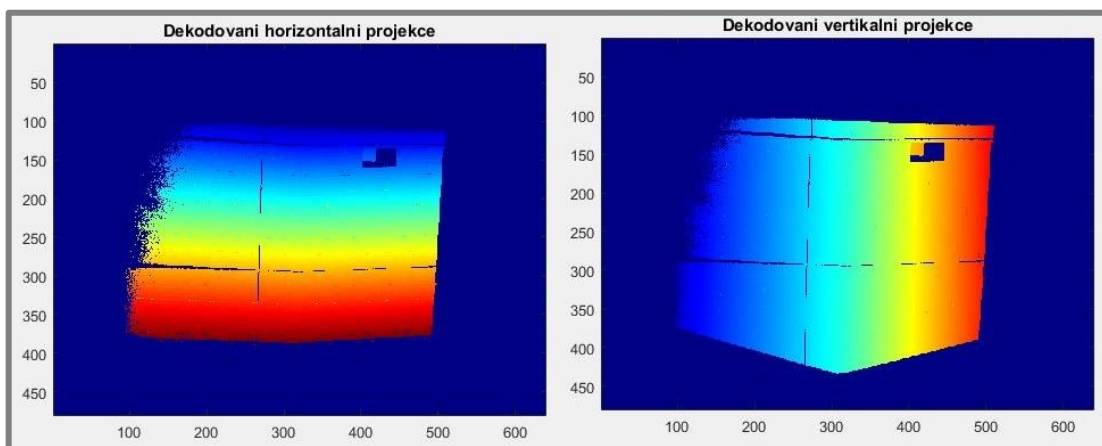
Tento objekt je menší než výše zmíněná krabice, a proto byl zvolen menší měřicí objem 3D skeneru (jiná triangulační vzdálenost mezi kamerou a projektor, rozdílná velikost kalibrační desky). Objekt disponuje nepravidelnými tvary, a také materiál není tak ideální jako v předchozím případě. Jedná se zejména o vliv kontrastu mezi jednotlivými pruhy během skenování.

5.2.5 Výsledky dekodování promítané sekvence

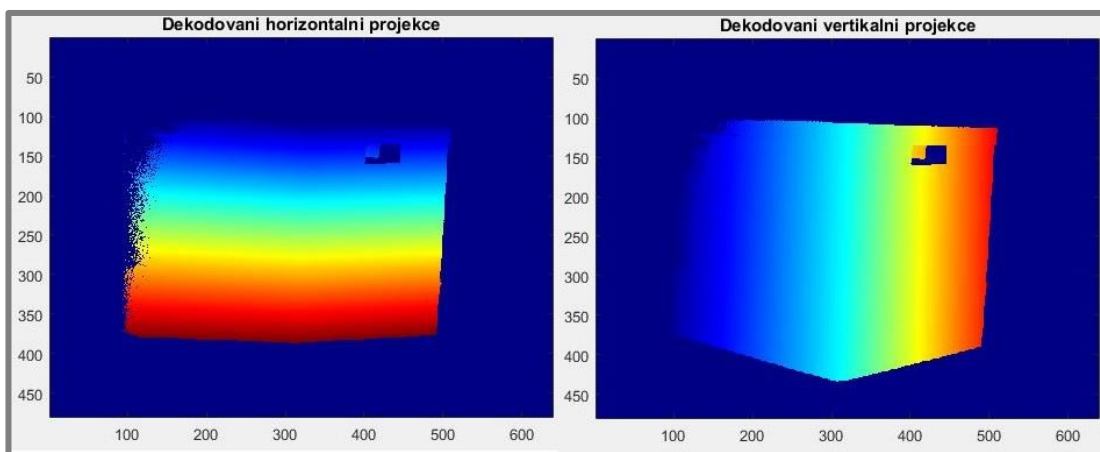
Jak již bylo zmíněno výše na referenčních objektech bylo odzkoušeno binární a Grayovo kódování. Výsledky jsou zobrazeny v barevné mapě pro vertikální a horizontální projekci. Barevná mapa ukazuje výsledky dekodování jednotlivých pruhů pixelů projektoru. V ideálním případě by se barvy na mapě měly měnit plynule podél jednotlivých směrů (vertikálně a horizontálně). Výsledky dekodování krabice jsou ukázány na **Obr. 5-9** pro binární a na **Obr. 5-10** pro Grayovo kódování.

Z výsledků je jasně patrné, že Grayovo kódování je podstatně robustnější oproti binárnímu, kde lze jasně vidět problémy s dekodováním na rozhraní nevariujících se pruhů, které jsou vidět v podobě tmavě modré barvy (neidentifikované pruhy díky malému kontrastu) přibližně uprostřed skenované krabice. Skenování proběhlo za ideálních podmínek v zatemněné místnosti kvůli zvýšení potřebného kontrastu.

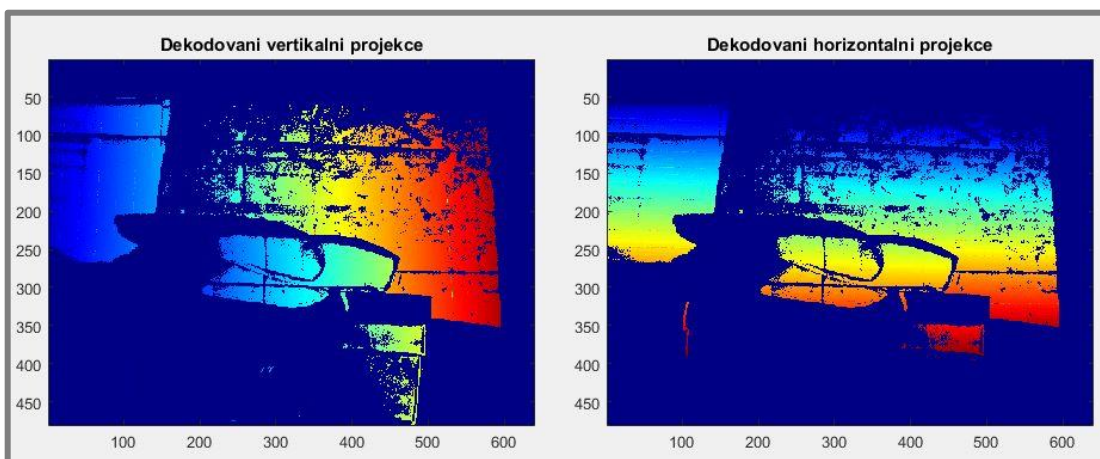
Při dekodování druhého referenčního objektu bylo potřeba snížit limitní hodnotu kontrastu, aby bylo možné dekodovat celý model. To mělo také za následek dekodování stěny nacházející se za modelem. Výsledky jsou o něco horší než v případě prvního referenčního objektu, ale dají se použít pro další rekonstrukci.



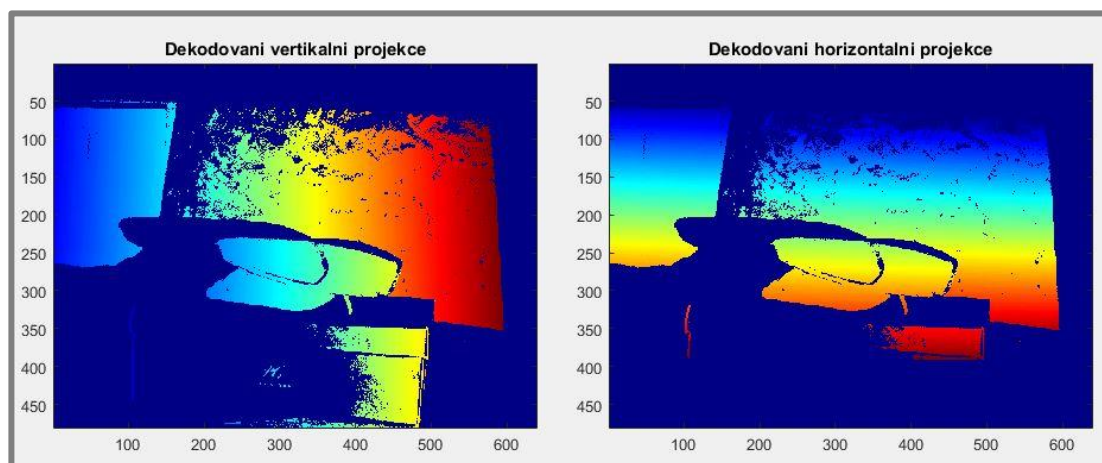
Obr. 5-9 Výsledky dekódování binární projekce – Krabice



Obr. 5-10 Výsledky dekódování Grayovy projekce – Krabice



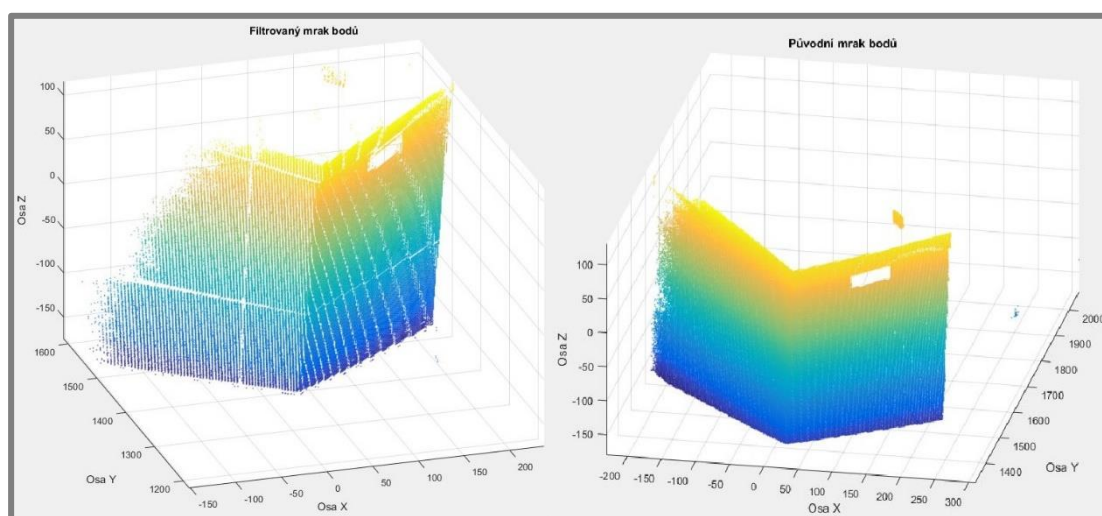
Obr. 5-11 Výsledky dekódování binární projekce – Skútr



Obr. 5-12 Výsledky dekodování binární projekce – Skútr

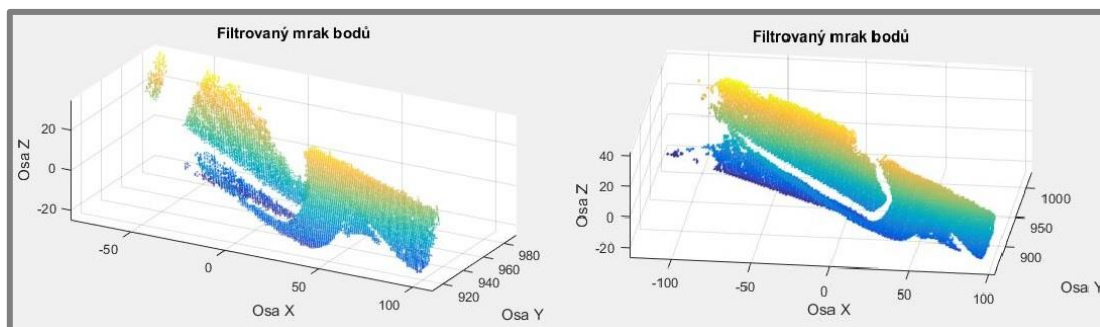
5.2.6 Výsledný mrak bodů

Výsledky dekodování mají výrazný vliv na podobu výsledného mraku bodů nebo vůbec možnosti jej sestavit. Aby mohlo dojít k úspěšné rekonstrukci je zapotřebí, aby souhlasil počet dekódovaných vertikálních a horizontálních bodů. Z výsledků je patrné, že při použití Grayova promítání má výsledný mrak „čistější“ a neobsahuje tolik špatně dekódovaných bodů viz **Obr. 5-13** a **Obr. 5-14**.



Obr. 5-13 Srovnání mraku bodů krabice. Vlevo jsou zobrazeny výsledky binárního a vpravo Grayova kódování.

Při porovnání mraku bodů mezi oběma referenčními objekty je zjevné, že pravidelná krabice má větší množství bodů a vypadá poměrně spojitě. Model skútru je tvořen mrakem bodů, který je více segmentovaný vlivem vrhání stínů přes povrch měřeného objektu. U modelu skútru jde také vidět veliký rozdíl ve spolehlivosti rekonstrukce při užití binárního a Grayova kódu.



Obr. 5-14 Srovnání mraku bodů modelu skůtru. Vlevo jsou zobrazeny výsledky binárního a vpravo Grayova kódování.

5.3 Ovládání 3D skeneru

5.3

Pro práci se 3D skenerem bylo nutné vytvořit několik uživatelských grafických prostředí (GUI). Všechna prostředí jsou dělána programovacím přístupem tzn. rozmístění jednotlivých prvků prostředí a jejich volání je realizováno z jednoho místa. Což je velký rozdíl, oproti využití prostředí GUIDE v Matlabu, kde je odděleno rozmístění funkčních tlačítek a ovládacích prvků tzv. layout a volaných funkcí tzv. callbacků. GUIDE navíc předpřipraví funkce pro jednotlivá tlačítka. Problém je, že při větším množství ovládacích prvků je orientace v kódu poměrně složitá, protože generuje velké množství „nechtěného“ textu.

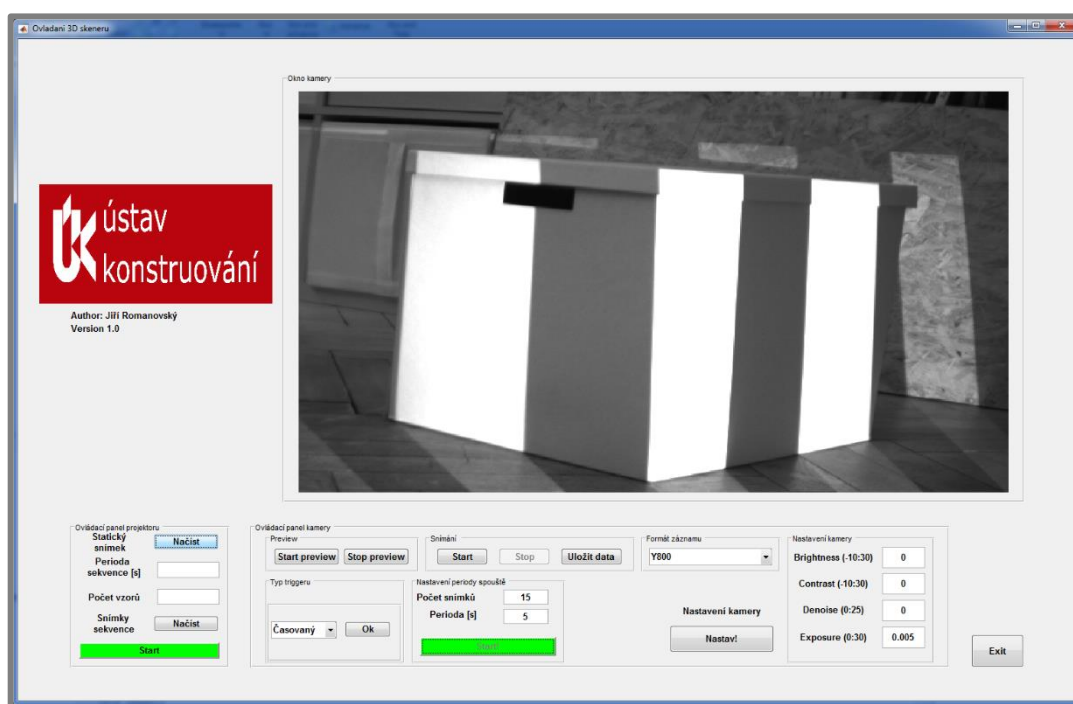
Celkem byly vytvořeny čtyři ovládací prostředí, do kterých je možné libovolně zasahovat a náležitě je modifikovat. Přesný popis těchto prostředí je uveden v příloze 1 společně s návodem na ovládání všech funkcí 3D skeneru.

5.3.1 Ovládací prostředí kamery a projektoru 3D skeneru

5.3.1

Ovládací prostředí bylo navrženo tak, aby šla obsluhovat kamera i projekční jednotka najednou. GUI také umožňuje samostatné ovládání kamery nebo projektoru. Je ovšem zapotřebí, aby zůstaly připojeny k počítači. Pokud to není možné lze jednoduchým způsobem upravit volací skript. Ukázka z prostředí je zobrazena na **Obr. 5-15**. Tlačítka a ovládací prvky nejsou všechny ze startu aktivní, aby byl uživatel 3D skeneru naveden, které funkce a příkazy lze v daném momentu použít.

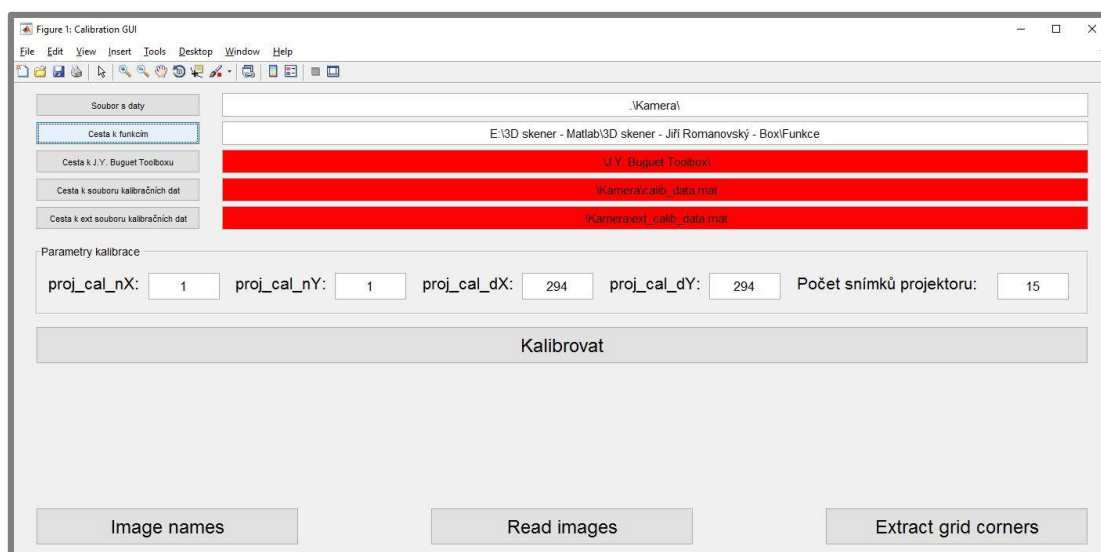
Stěžejní funkcí ovládacího prostředí je synchronizace mezi kamerou a projektorem. Synchronizace spočívá v časovaném sepnutí spouště kamery v momentu, kdy projekční jednotka promítá snímky v rámci sekvence. Jelikož jsou snímky nahrávány postupně do paměti projektoru, přičemž nahrávací čas není vždy stejný, je nutné měřit nahrávací čas snímku a až poté sepnout kameru. Získané snímky zůstávají zobrazeny v okně náhledu kamery. V prostředí je rovněž ošetřeno opouštění tohoto prostředí tak, aby připojená zařízení ukončila veškerou činnost v lokálním ovládacím počítači a tím umožnila připojení v budoucnu.



Obr. 5-15 Ukázka ovládacího prostředí 3D skeneru

5.3.2 Grafické rozhraní kalibrace 3D skeneru

Kalibrace 3D skeneru využívá funkcí z kalibračního toolboxu J. Y. Bogueta. Postup kalibrace je proto stejný jako u originálního toolboxu. Velkou výhodou je možnost definovat z grafického okna umístění kalibračních snímků a také cestu k samotnému toolboxu. Samotný kalibrační skript potom využívá kalibrační metodu navrženou [3]. Ukázka navrženého prostředí je na Obr. 5-16.



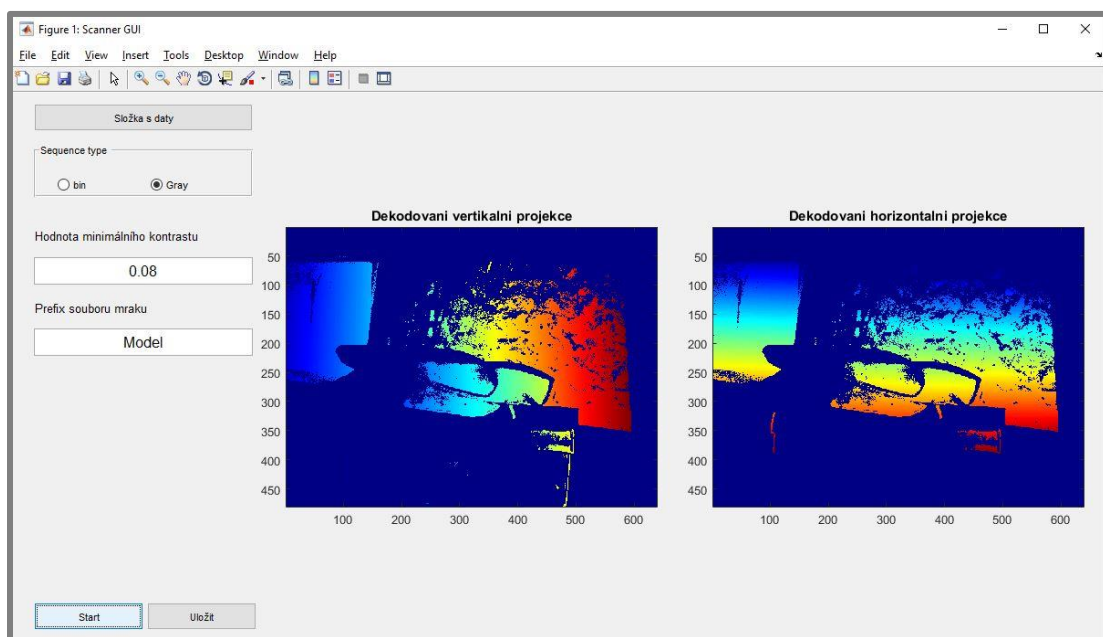
Obr. 5-16 Ukázka kalibračního prostředí

Podrobný popis prostředí kalibrace je uveden v příloze 1.

5.3.3 Grafické rozhraní dekódování projekce

5.3.3

GUI pro dekódování projekce je poměrně jednoduché a umožňuje nahrání kalibračních dat, nastavení limitní hodnoty kontrastu, určení zda se jedná o binární nebo Grayovo dekódování, pojmenování generovaného mraku bodů ve formátu PLY a zobrazení výsledků dekódování. Ukázka prostředí na **Obr. 5-17**.

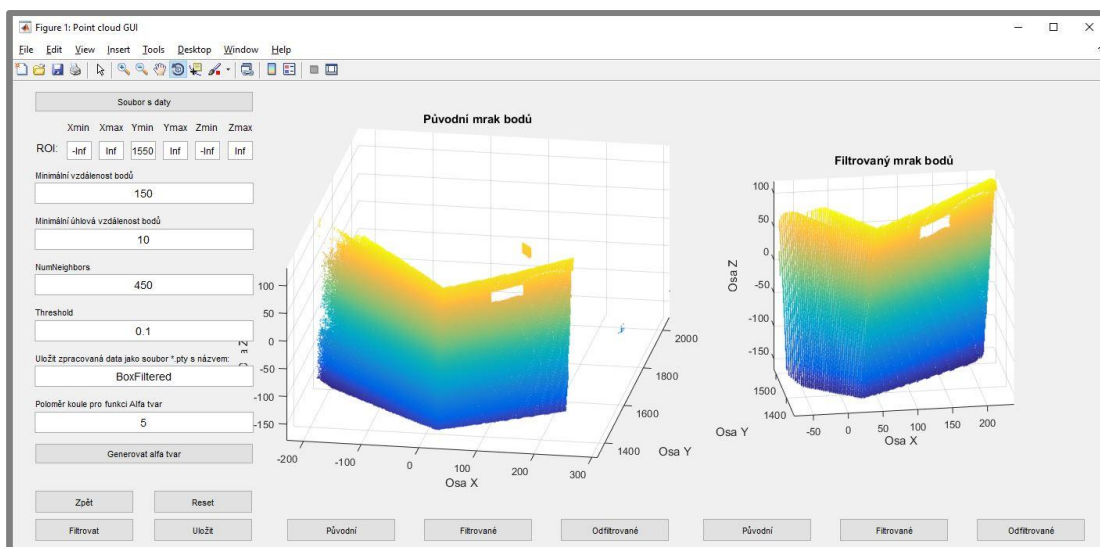


Obr. 5-17 Ukázka prostředí dekódování projekce

5.3.4 Grafické rozhraní zpracování a vizualizace mraku bodů

5.3.4

Posledním vytvořeným prostředím je rozhraní pro zpracování mraku bodů. Toto prostředí umožňuje filtraci a zobrazování mraku bodů, a to před filtrací, po filtraci a také odfiltrované body. Filtraci je možné opakovat vícekrát s jinými parametry funkce *pcdenoise*, přičemž odfiltrované body v předchozí filtraci zůstávají odfiltrovány. Prostředí také umožňuje polygonizaci mraku bodů metodou Alpha Shapes. Ukázka prostředí je na **Obr. 5-18**.



Obr. 5-18 Ukázka zpracování a vizualizace mraku bodů

5.4 Porovnání přesnosti s komerčním 3D skenerem

Vytvořený 3D skener byl porovnán s komerčním 3D skenerem ATOS Triple Scan. Optický 3D skener ATOS je špičkovým měřicím systémem od německé firmy GOM. Z pohledu konfigurace se jedná o 3D skener na bázi strukturovaného světla s dvěma kamerami a projekční jednotkou. Základní parametry 3D skeneru ATOS III Triple Scan jsou uvedeny v **Tab. 2**.

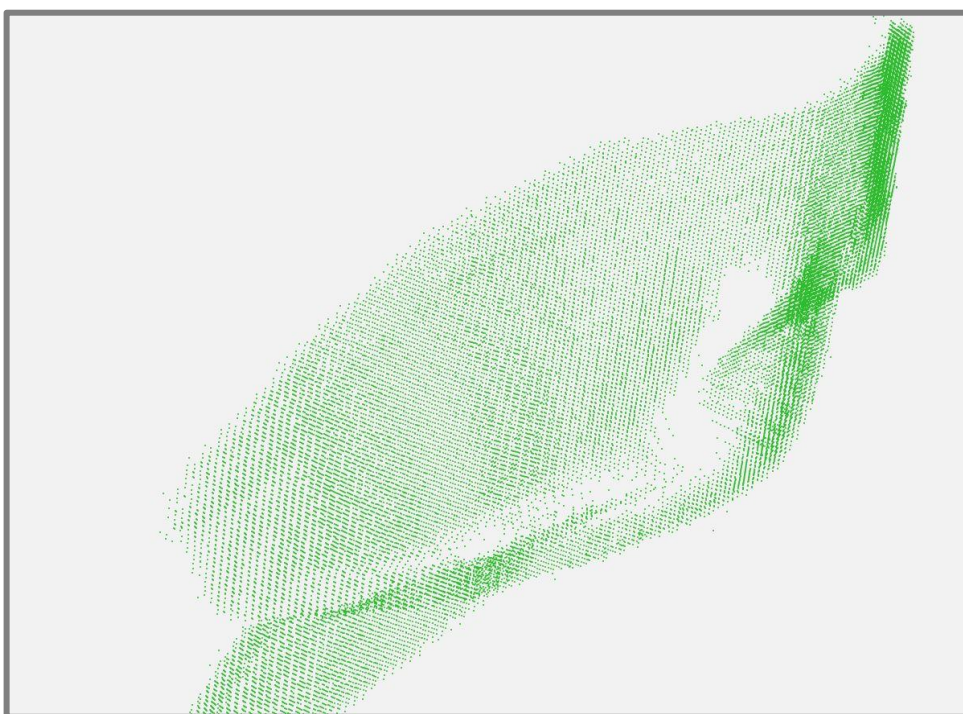
Tab. 2 Základní parametry 3D skeneru ATOS [28]

Optický systém	ATOS III Triple Scan
Rozlišení kamer	2x8000 000 pixelů
Plocha měření	38 mm ² až 2000 mm ²
Vzdálenost bodů	0,01 mm – 0,61 mm
Pracovní teplota	5 – 40°C
Počet naměřených bodů na sken	8 miliónu bodů

Měření odchylek bylo provedeno v softwaru GOM Inspect, který umožňuje import mraku bodů ve formátu PLY. Rozdíly v přesnosti mezi experimentálním a komerčním 3D skenerem bylo v plánu udělat pomocí analýzy odchylek, která pracuje s polygonální sítí. Po importu mraku bodů z Matlabu se ovšem ukázalo, že mrak nepůjde jednoduše převést na polygonální síť. Při podrobnějším zkoumání výsledného mraku bodů vyšlo najevo, že mrak obsahuje množství duplicitních bodů viz **Obr. 5-20** a **Obr. 5-19**. Možné důvody, které to způsobují jsou uvedeny v diskuzi.



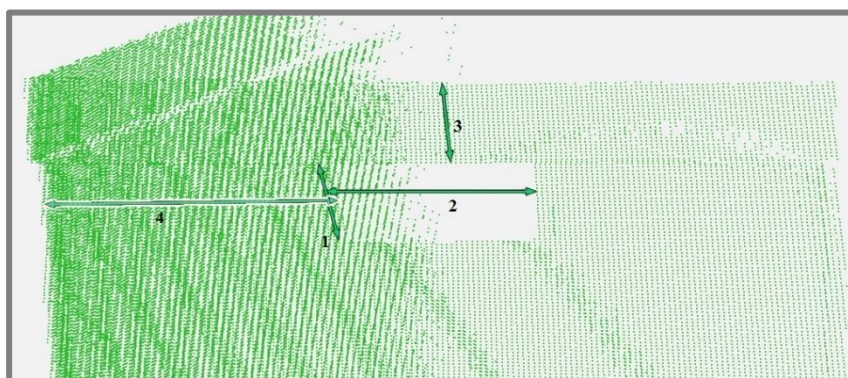
Obr. 5-19 Detail importovaného mraku bodů.



Obr. 5-20 Mrak bodů importovaný do softwaru GOM Inspect

Jelikož nebylo možné převést získané mraky bodů na polygonální síť a provést analýzu odchylek přes celý měřený objekt, tak bylo vytipováno několik bodů na krabici mezi kterými byla měřena vzdálenost. Není to příliš přesná metoda, ale může nám dát aspoň přibližné výsledky přesnosti experimentálního 3D skeneru.

Na papírové krabici byla provedena měření čtyř vzdáleností **Obr. 5-21**. Výsledky měření jsou uvedeny v **Tab. 3**.



Obr. 5-21 Ukázka čtyř vybraných vzdáleností.

Tab. 3 Porovnání přesnosti 3D skeneru ATOS III s experimentálním skenerem

Měřicí systém	ATOS III Triple Scan	Experimentální 3D skener
Měření 1	27,5 mm	26,5 mm
Měření 2	80,5 mm	69,5 mm
Měření 3	25,7 mm	24,4 mm
Měření 4	112,3 mm	102,6 mm

Měření u druhého referenčního objektu nebyla provedena, protože je zde problém vybrat nějaký jednoznačný rozměr pro měření. Z výsledků plyne, že odchylky kót v horizontálním směru jsou výrazně větší než ve směru vertikálním. Možné důvody, proč tomu tak je jsou zmíněny v diskuzi.

6 DISKUZE

6

Zadáním diplomové práce bylo vytvořit 3D skener pro výukové účely, který umožní základní demonstraci procesů spojených se záznamem tvaru objektu. 3D skener byl navržen tak, aby umožnil implementaci, testování a vývoj dalších metod spojených s 3D skenováním v budoucnu. Z rozsahu výsledků a použitých metod je patrné, že konstrukce a naprogramování 3D skeneru jako celku je velmi komplexní záležitostí.

6.1 Konstrukce 3D skeneru

6.1

Navržená konstrukce 3D skeneru je velmi jednoduchá z důvodu zachování vysoké variability při testování nových skenovacích metod v budoucnu. Výhodou je možnost rychlého přenastavení měřicího objemu posunutím kamery ve stativové liště. Její nevýhodou může být malá tuhost uložení stativové lišty na stativu.

6.2 Kalibrace 3D skeneru

6.2

Kalibrace optických částí 3D skeneru byla klíčová pro přesnost rekonstrukce. Využil jsem metody kalibrace navržené D. Lanmanem a G. Taubinem [3], která využívá některé funkce široce rozšířeného toolboxu od J. Y. Bougueta [14]. Problémem se ukázala kalibrace projektoru, který má netradičně koncipovanou pixelovou mřížku do tzv. diamantu. Navíc poměr stran promítaného obrazu je zásadně odlišný od nativního rozlišení projektoru. Tento nesoulad podle mého názoru vede ke kalibračním chybám, které se naplno projeví při porovnání přesnosti rekonstrukce se skenerem ATOS III Triple Scan. Proto je potřeba dalších testů a měření, které více objasní vliv pixelové mřížky na přesnost kalibrace projektoru.

6.3 Dekódování binárního a Grayova kódu

6.3

Výsledky 3D skenování využitím binární a Grayovy metody kodifikace vedly podle očekávání k rozdílným výsledkům. Na základě rešerše byl předpoklad, že Grayova kodifikace a následné dekodování promítané sekvence má spolehlivější výsledky. Tento předpoklad se naplno projevil při zobrazení barevné mapy hodnot, která vyjadřuje úspěšnost přesnosti dekodování na základě znalosti promítaného vzoru. Tzn., že čím spojitější barevná mapa bez skokových změn, tím jsou přesněji přiřazeny pozice jednotlivých pixelů projektoru v pixelové mřížce kamery.

Členění pixelové mřížky projektoru přináší také komplikace při dekodování projekce. Je to dáno nativním rozlišením projekční jednotky 608x684 pixelů při poměru stran promítaného obrazu 16:9. V praxi to znamená, že velikost horizontálních proužků (řádků) je přibližně 2x menší než proužků vertikálních. Tento nepoměr může vést opět k chybám v rekonstrukci z důvodu horší rozlišitelnosti kamerou 3D skeneru.

6.4 Vytvoření mraku bodů

6.4

Výsledky dekodování mají zásadní vliv na kvalitu vytvořeného mraku bodů. Což jde opět vidět při porovnání binárního a Grayova kódu. Rozdíly lze pozorovat nejen v oblasti množství dekodovaných bodů, ale také jejich polohy, kdy výsledky užití Grayova kódování téměř nepotřebují dodatečnou filtraci šumu v nejbližším okolí mraku bodů.

6.5 Ovládací software 3D skeneru

3D skener je sestaven z projekční jednotky LightCrafter a CCD kamery Imagine Source. Vytvoření ovládání pro kameru se z počátku zdálo poměrně jednoduché, protože výrobce kamery poskytuje volně ke stažení adaptér k Image Acquisition Toolboxu v Matlabu. Kameru je sice možné ovládat poměrně jednoduchými příkazy, ale problém nastává, když uživatel např. vypne ovládací prostředí bez řádného ukončení procesů kamery. Při další iniciaci se totiž kamera již znova nespustí a je značný problém ji zase uvést do provozu. Tyto chyby často vyústí k nutnosti restartovat Matlab. Ošetření podobných událostí je poměrně náročné a vyžaduje důkladné testování.

Projekční jednotka je ovládána zasíláním příkazových paketů prostřednictvím virtuálního ethernetu. Tyto pakety mají podobu strojového kódu. Na rozdíl od kamery je ovšem programování ovládání podstatně složitější, protože programátor nemá jakoukoli zpětnou vazbu o tom, jak zasílané příkazy vypadají nebo kde se nachází možná chyba v kódu. Za tímto účelem byl využit program WireShark pomocí, kterého lze odposlouchávat komunikaci mezi projekční jednotkou a Matlabem. I s využitím tohoto nástroje se ovšem nepodařilo realizovat nahrávání sekvence snímků do paměti projektoru. Proto musela být využita metoda nahrávání jednotlivých snímků do flash paměti projektoru. Tato metoda sebou nese omezení v podobě nahrávacích časů snímků do projektoru a tím i výraznému prodloužení doby skenovací sekvence. Výhodou je naopak velká volnost při vytváření promítaných vzorů, kde jsme v podstatě omezeni jen požadovaným rozlišením projektoru.

Součástí diplomové práce bylo také vytvoření uživatelského prostředí pro ovládání dalších skriptů 3D skeneru. Podařilo se vytvořit čtyři grafická uživatelská rozhraní, která podstatně ulehčují práci s 3D skenerem.

6.6 Výsledky porovnání s komerčním 3D skenerem ATOS

Porovnání s komerčním 3D skenerem ATOS Triple Scan nedopadlo úplně nejlépe, ale je potřeba mít na paměti, že 3D skener ATOS využívá při dekódování projekce přesnější metody fázového posunu, a také využívá dvou kamer o vysokém rozlišení. Rovněž u kalibrace 3D skeneru využívá na míru vyrobených kalibračních desek, které počítají také s teplotní roztažností vlivem okolního prostředí. Navíc cena tohoto systému je o několik řádů vyšší.

Z výsledků jdou vidět velké nepřesnosti v horizontálním směru, ale je také možné, že ve směru vertikálním se tyto nepřesnosti tolik neprojeví díky malé vzdálenosti mezi měřenými body. Výskyt duplicitních bodů může být způsoben nízkým rozlišením projektoru díky, kterému kamera identifikuje více pixelů se stejným kódovým slovem. Tento problém by mohl jít vyřešit vyhledáváním a eliminováním pixelů, které mají stejné kódové slovo v kontextu pohledu z kamery.

Vyvinutý experimentální 3D skener představuje platformu, která může být dále modifikována a zlepšována, avšak její omezené technické parametry neumožní vytvoření přesnějšího systému než výše zmiňovaný 3D skener ATOS III Triple Scan

7 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vytvořit 3D skener založený na metodě strukturovaného světla. 3D skener byl sestaven s využitím projekční jednotky LightCrafter a kamery Imaging Source. Takto vyvinutý 3D skener měl umožnit demonstraci všech základních procesů vedoucích k zaznamenání tvaru objektu. Nedílnou součástí tohoto 3D skeneru by mělo být v budoucnu zpřístupnit možnosti implementace a testování dalších metod pro záznam objektu.

Celkové zadání a řešení diplomové práce bylo poměrně komplexní a zahrnovalo využití širokého spektra metod využívaných v oblasti 3D skenování metodou strukturovaného světla. Dosavadní výsledky rekonstrukce obrazu pomocí vyvinutého 3D skeneru sice nejsou příliš uspokojivé, ale samotný 3D skener je připraven pro testování a optimalizaci zjištěných nedostatků, které pravděpodobně plynou z nepřesností při kalibraci projekční jednotky.

Při řešení diplomové práce bylo použito přibližně kolem šesti tisíců řádků kódu. Některé kódy byly převzaty z jiných již řešených projektů, některé byly doplněny a patřičně upraveny pro požadované použití. Dále bylo naprogramováno množství zcela nových kódů. Všechny tyto data byly spojeny v jeden celek do podoby ucelené aplikace. Tento aspekt je velmi důležitý pro následné testování a využití 3D skeneru studenty Ústavu konstruování, protože nevyžaduje žádnou znalost kódu při testování a využívá již naprogramovaných metod a funkcí.

Vyvinutý 3D skener může představovat platformu, na které budou testovány nové metody z oblasti 3D digitalizace objektů, ale také může sloužit jako výuková pomůcka při demonstraci procesu 3D skenování, včetně jeho všech aspektů této problematiky. Na závěr lze konstatovat, že požadovaných cílů bylo dosaženo a zadané cíle diplomové práce byly splněny v plném rozsahu.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BELLOCCHIO, Francesco. *3D surface reconstruction: multi-scale hierarchical approaches*. New York: Springer, c2013, vi, 162 p.
- [2] IMPACT. Basic Principles of CT Scanning. PLATTEN, David. IMPACT. *Impactscan* [online]. 2005 [cit. 2015-10-20]. Dostupné z: http://www.impactscan.org/slides/impactcourse/basic_principles_of_ct/img0.html
- [3] LANMAN, Douglas a Gabriel TAUBIN. Build your own 3D scanner. *ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Courses on - SIGGRAPH ASIA '09*. New York, New York, USA: ACM Press, 2009, , 1-94. DOI: 10.1145/1665817.1665819. Dostupné také z: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1665817.1665819>
- [4] PEARS, Nick, Yonghuai LIU a Peter BUNTING. *3D imaging, analysis and applications*. London: Springer, 2012, xvi, 499 pages.
- [5] CVUT. *3D laserové skenování - teorie* [online]. 2015 [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <http://lfgm.fsv.cvut.cz/data/vvt/sl/laserteorie3d.pdf>
- [6] PAGÈS, J. a J. SALVI. Coded light projection techniques for 3D reconstruction. *J3eA*. 2005, **4**(3), -. DOI: 10.1051/bib-j3ea:2005801. Dostupné také z: <http://www.j3ea.org/10.1051/bib-j3ea:2005801>
- [7] SALVI, Joaquim, Jordi PAGÈS a Joan BATLLE. Pattern codification strategies in structured light systems. *Pattern Recognition*. 2004, **37**(4), 827-849. DOI: 10.1016/j.patcog.2003.10.002. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0031320303003303>
- [8] PAGÈS, Jordi a Joaquim SALVI. INSTITUT D'INFORMÀTICA I APLICACIONS. *Overview of coded light projection techniques for automatic 3D profiling* [online]. b.r. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: http://www1.cs.columbia.edu/~allen/PHOTOPAPERS/structuredlight_salvi.ppt
- [9] BERGMANN, D. New approach for automatic surface reconstruction with coded light. *Proceedings of Remote Sensing and Reconstruction for Three-Dimensional Objects and Scenes*. 1995, (2572), 2-9.
- [10] GUHRING, J. Dense 3-d surface acquisition by structured light using off-the-shelf components. *Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement*. 2001, (4309), 220-231. Dostupné také z: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2001/Videometrics01-Guehring-4309-24.pdf>
- [11] GÜHRING, . Dense 3-D surface acquisition by structured light using off-the-shelf components. *Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement*. 2000, **4309**(8). Dostupné také z: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2001/videometrics01-guehring-4309-24.pdf>
- [12] TSAI, R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Journal on Robotics and Automation*. 1987, **3**(4), 323-344. DOI:

- 10.1109/JRA.1987.1087109. Dostupné také z:
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1087109>
- [13] ZHANG, Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2000, **22**(11), 1330-1334. DOI: 10.1109/34.888718.
- [14] BOUGET, Jean. Camera Calibration Toolbox for Matlab. CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY. *Computational Vision at CALTECH* [online]. 2013 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/
- [15] SURIANSKY, Jozef a Michal CMARADA. ANALYSIS OF METHODS FOR CAMERA CALIBRATION IN 3D SCANNING SYSTEMS. In: KATALINIC, [editor] Branko a organized by: DAAAM International Vienna ... [et]. AL]. *23rd DAAAM International symposium Conference papers*. Vienna: DAAAM International, 2012, s. 365-368.
- [16] RAJA, Vinesh a Kiran J FERNANDES. *Reverse engineering: an industrial perspective*. London: Springer, c2008, xviii, 242 p.
- [17] LEIFER, Filip. *Delaunayho triangulace a její aplikace*. Brno, 2006. Diplomová práce. VUT v Brně, FSI ústav automatizace a informatiky.
- [18] BERG, Mark de. *Computational geometry: algorithms and applications*. 3rd ed. Berlin: Springer, c2008, xii, 386 s.
- [19] VARNUŠKA, Michal. *Rekonstrukce povrchů geometrických objektů z roztroušených bodů*. Plzeň, 2002. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra informatiky a výpočetní techniky.
- [20] LORENSEN, William E. a Harvey E. CLINE. Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. In: EDITED BY MAUREEN C. STONE, . *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '87*. New York, New York, USA: ACM Press, 1987, s. 163-169. DOI: 10.1145/37401.37422. Dostupné také z: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=37401.37422>
- [21] EDELSBRUNNER, Herbert a Ernst P. MUCKE. Three-Dimensional Alpha Shapes. In: *ACM Transaction on Graphics*. University of Illinois: ACM, 1994, s. 43-72.
- [22] *DLP projektory* [online]. CC, 2014 [cit. 2017-01-30]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/1566-dlp-projektory>
- [23] *DMD 101: Introduction to Digital Micromirror Device (DMD) Technology* [online]. Dallas (USA): TEXAS INSTRUMENTS, 2016 [cit. 2017-01-30]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/dlpa008a/dlpa008a.pdf>
- [24] TEXAS INSTRUMENTS, . *DLP LightCrafter DM365 Command Interface Guide*. Dallas(USA): Texas Instruments Incorporated, 2013.
- [25] *MathWorks Documentation: Getting Started Doing Image Acquisition Programmatically* [online]. UK: The MathWorks, Inc., 2016 [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: <https://uk.mathworks.com/help/imaq/basic-image-acquisition-procedure.html>

- [26] ZHANG, Z. CAMERA CALIBRATION. In: MEDIONI, G. a S. B. KANG. *Emerging Topics in Computer Vision*. Prentice Hall Professional Technical Reference, 2004, s. 4-43.
- [27] FALCAO, Gabriel. *Plane-based calibration of a projector-camera system*. VIBOT Master, 2008.
- [28] ATOS Triple Scan: Industrial Optical 3D Digitizer. *Henindo Technology* [online]. b.r. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: http://www.henindo.co.id/home/ATOS-Triple-Scan_EN_RevA.pdf
- [29] LUO, Huafen a Jing XU. A simple calibration procedure for structured light system. *Optics and Lasers in Engineering*. 2014, **57**, 6-12. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2014.01.010. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0143816614000116>
- [30] *MINIMO GRAPH: GEOMETRY + COLORS + DESIGN* [online]. 2015 [cit. 2015-12-08]. Dostupné z: <https://minimograph.files.wordpress.com/2013/06/delaunay-triangulation.png>
- [31] AUTOR NEZNÁMÝ, . *The marching cubes* [online]. 2015 [cit. 2015-12-13]. Dostupné z: <http://users.polytech.unice.fr/~lingrand/MarchingCubes/algo.html>
- [32] DOUGLASS, Michael R., Philip S. KING, Benjamin L. LEE, Jakob WILM, Oline V. OLESEN a Rasmus LARSEN. *Accurate and simple calibration of DLP projector systems*. In: . b.r. DOI: 10.1117/12.2038687. Dostupné také z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2038687>
- [33] TEXAS INSTRUMENTS. *DLP® LightCrafter™ Evaluation Module (EVM): User's Guide* [online]. Listopad 2014. 2012 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/dlpu006e/dlpu006e.pdf>
- [34] *Imaging Source: DMK 23U618* [online]. Bremen (Germany): The Imaging Source Europe GmbH, 2017 [cit. 2017-01-31]. Dostupné z: <https://www.theimagingsource.com/products/industrial-cameras/usb-3.0-monochrome/dmk23u618/>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9

GUI	- Graphic User Interface
DLP	- Digital Light Projector
CMM	- Coordinate measuring machine
CT	- Computed Tomography
RTG	- rentgenové záření
CCD	- Charged Coupled device
SfM	- Structure for Motion
SPECT	- Single-photon emission computed tomography
MC	- Marching Cubes
DMD	- Digital micromirror devices
CMOS	- Complementary Metal–Oxide–Semiconductor

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Rozdělení skenovacích metod dle fyzikálních principů [1]	14
Obr. 2-2 Rozdělení optických skenovacích systémů [1]	16
Obr. 2-3 Schéma aktivního laserového 3D skeneru [3]	16
Obr. 2-4 Princip jedné z pasivních metod - stereoskopie [1]	17
Obr. 2-5 Ukázka rekonstrukce povrchu ze stínování [4]	18
Obr. 2-6 Ukázka binárního kódu [3]	21
Obr. 2-7 Klasifikace různých typů kodifikace [7]	22
Obr. 2-8 Schéma promítání jednoho proužku a strukturovaného světla [11]	23
Obr. 2-9 Znázornění šedého kódu a liniového posuvu [11]	23
Obr. 2-10 Princip skenování metodou strukturovaného světla [28]	25
Obr. 2-11 Tečné zkreslení čočky optického systému [15]	26
Obr. 2-12 Srovnání kalibračních softwarů [15]	27
Obr. 2-13 Metodika rekonstrukce povrchu [16]	28
Obr. 2-14 Konvexní obálka množiny 6 bodů [19]	29
Obr. 2-15 Ukázka Delaunayovy triangulace [29]	30
Obr. 2-16 V – diagram množiny 11 bodů v 2D prostoru [19]	30
Obr. 2-17 Možnosti triangulace krychle [30]	31
Obr. 2-18 Vliv parametru α na výslednou podobu α -shapes. Zleva limitní hodnota parametru α , kdy je výsledkem celá Dt. Vpravo-dole limitní hodnota $\alpha=0$. [21]	32
Obr. 4-1 Schéma měřicího řetězce včetně postupu softwarových metod	36
Obr. 4-2 Schéma projektoru LightCrafter [22]	37
Obr. 4-3 Diamantové uspořádání pixelové mřížky. [31]	38
Obr. 4-4 Šachovnicový vzor nahraný do projektoru	38
Obr. 4-5 Projekční jednotka LightCrafter [32]	39
Obr. 4-6 Kamera ImagingSource [33]	39
Obr. 4-7 Návrh velikosti stativové lišty	40
Obr. 4-8 Struktura příkazového balíku [24]	42
Obr. 4-9 Imaq tool v Matlabu [25]	44
Obr. 4-10 Pin hole model kamery [26]	45
Obr. 4-11 Výběr hranic šachovnicového vzoru	47
Obr. 4-12 Schéma kalibrace projektoru [3]	47
Obr. 4-13 Ukázka binárního a Grayova kódu [3]	49
Obr. 4-14 Triangulace optický paprsek – rovina [3]	50
Obr. 4-15 Triangulace optický paprsek – optický paprsek [3]	51
Obr. 5-2 Sestava 3D skeneru se stativem	53
Obr. 5-1 Rozpad sestavy 3D skeneru	53
Obr. 5-3 Zobrazení pozic kalibrační desky vůči souřadnému systému kamery	54
Obr. 5-4 Extrakce rohů promítnuté šachovnice při kalibraci projektoru	55
Obr. 5-5 Extrakce rohů kalibračních targetů	56
Obr. 5-6 Vzájemná pozice mezi projektorem a kamerou pro první snímek kalibrace	57
Obr. 5-7 Referenční objekt – krabice	57
Obr. 5-8 Referenční objekt – sněžný skútr	58
Obr. 5-9 Výsledky dekódování binární projekce – Krabice	59
Obr. 5-10 Výsledky dekódování Grayovy projekce – Krabice	59
Obr. 5-11 Výsledky dekódování binární projekce – Skútr	59

Obr. 5-12 Výsledky dekodování binární projekce – Skútr	60
Obr. 5-13 Srovnání mraku bodů krabice. Vlevo jsou zobrazeny výsledky binárního a vpravo Grayova kódování.	60
Obr. 5-14 Srovnání mraku bodů modelu skútru. Vlevo jsou zobrazeny výsledky binárního a vpravo Grayova kódování.	61
Obr. 5-15 Ukázka ovládacího prostředí 3D skeneru	62
Obr. 5-16 Ukázka kalibračního prostředí	62
Obr. 5-17 Ukázka prostředí dekodování projekce	63
Obr. 5-18 Ukázka zpracování a vizualizace mraku bodů	64
Obr. 5-19 Detail importovaného mraku bodů	65
Obr. 5-20 Mrak bodů importovaný do softwaru GOM Inspect	65
Obr. 5-21 Ukázka čtyř vybraných vzdáleností.	66

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Limitní hodnoty velikosti triangulační báze	41
Tab. 2 Základní parametry 3D skeneru ATOS [28]	64
Tab. 3 Porovnání přesnosti 3D skeneru ATOS III s experimentálním skenerem	66

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Uživatelský manuál k ovládání 3D skeneru